



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO CEDETEG  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS – SEAA/G  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – PPGG**



**DIEGO MAIKON BAZZOTTI**

**RELAÇÃO ENTRE COBERTURA SUPERFICIAL E  
PIEZOMETRIA EM ENCOSTA COM PROCESSO DE EROÇÃO  
EM TÚNEIS E VOÇOROCA NO LESTE DE CASCAVEL (PR)**

**Guarapuava  
2013**

**DIEGO MAIKON BAZZOTTI**

**RELAÇÃO ENTRE COBERTURA SUPERFICIAL E  
PIEZOMETRIA EM ENCOSTA COM PROCESSO DE  
EROSÃO EM TÚNEIS E VOÇOROCA NO LESTE DE  
CASCAVEL (PR)**

**Guarapuava**

**2013**

**DIEGO MAIKON BAZZOTTI**

**RELAÇÃO ENTRE COBERTURA SUPERFICIAL E PIEZOMETRIA  
EM ENCOSTA COM PROCESSO DE EROÇÃO EM TÚNEIS E VOÇOROCA  
NO LESTE DE CASCAVEL (PR)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Geografia (Área de Concentração: Geomorfologia e Dinâmica da Paisagem).

**Orientadora:** Profa. Dra. Gisele Pietrobelli

**Guarapuava**

**2013**

Bazzotti, Diego Maikon

B364r Relação entre cobertura superficial e piezometria em encosta com processo de erosão em túneis e voçoroca no leste de Cascavel (PR) / Diego Maikon Bazzotti. -- Guarapuava, 2013  
xiii, 101 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Geografia, área de concentração em Geomorfologia e Dinâmica da Paisagem, 2013

Orientadora: Gisele Pietrobelli

Banca examinadora: José Edézio da Cunha, Luiz Gilberto Bertotti

#### Bibliografia

1. Geografia. 2. Cobertura superficial - geografia. 3. Erosão subsuperficial. 4. Túnel - erosão. 5. Piezometria. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Geografia.

CDD 551.372



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO CEDETEG  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS – SEAA/G  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA - PPGG

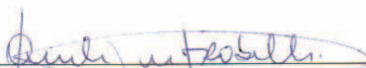


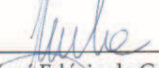
**TERMO DE APROVAÇÃO**

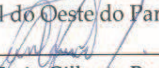
**DIEGO MAIKON BAZZOTTI**

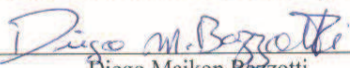
RELAÇÃO ENTRE COBERTURA SUPERFICIAL E PIEZOMETRIA EM ENCOSTA COM  
PROCESSO DE EROÇÃO EM TÚNEIS E VOÇOROCA NO LESTE DE CASCAVEL (PR)

Dissertação **APROVADA** em 26/04/2013 como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Geografia, na área de concentração Dinâmica da Paisagem e dos Espaços Rurais e Urbanos, da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), pela seguinte banca examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Gisele Pietrobelli – presidente  
Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Edézio da Cunha  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luiz Gilberto Bertotti  
Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO)

  
\_\_\_\_\_  
Diego Maikon Bazzotti

Guarapuava (PR), 26 de abril de 2013.

*Dedico este trabalho a minha família e minha noiva!  
Também aqueles que acreditam na simplicidade!*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Nadir Bazzotti e Marines Rigon Bazzotti, pelo integral apoio e incentivo aos estudos, também pela colaboração no decorrer da minha formação acadêmica, os quais auxiliaram no mestrado em trabalhos de monitoramento da encosta Bazzotti durante todo o período da pesquisa. Os meus sinceros agradecimentos!

A minha irmã Valéria pelo incentivo e apoio e meu cunhado Thiago pela ajuda nos trabalhos de campo.

A minha noiva Michelle Lorenci que contribuiu nos trabalhos laboratoriais e de campo, demonstrando companheirismo, compreensão e apoio na trajetória da minha vida acadêmica.

Aos meus familiares que contribuíam de forma indireta, mais com grande valia.

Agradeço imensamente a prof. Dra. Gisele Pietrobelli pela orientação, profissionalismo, paciência e amizade no decorrer da minha vida acadêmica, aprendi que não basta somente ter um diploma mais sim possuir caráter e ética profissional.

Aos meus amigos Wellington Barbosa da Silva; Viviane de Godoy; Rafael Adriano de Castro; Ariéli Santos Cordeiro e Tiago Giacomet por colaborarem de diversas formas no meu trabalho.

Agradeço aos professores Dr. Luiz Gilberto Bertotti; Prof. Dr. Adalto Gonçalves de Lima; Prof. Dr. Mauricio Camargo e Prof. Dr. Leandro Redin Vestena, que auxiliaram de forma direta e/ou indireta para o aprimoramento da minha pesquisa.

Ao técnico florestal Luiz André Pizzatto, por ter efetuado o levantamento topográfico da área de estudo.

Aos Laboratórios de Geologia e de Geomorfologia Dinâmica e Aplicada da Universidade Estadual do Centro-Oeste, representados pelos coordenadores Prof. Dra. Gisele Pietrobelli e Prof. Dr. Mauricio Camargo, por contribuírem na efetivação dos procedimentos laboratoriais da pesquisa.

Aos acadêmicos que não citei nomes mais de alguma forma contribuíram nos trabalhos.

Agradeço aos alunos do primeiro ano de bacharel em geografia de 2011, que auxiliaram nos trabalhos de campo.

A todos e a todas muito abrigado, por contribuírem direta ou indiretamente nesta conquista!



## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>CAPÍTULO I</b> .....	17
<b>1</b> <b>Caracterização histórica e geográfica de Cascavel e da área de estudo.</b> .....	17
<b>1.1</b> <b>Identificação da cobertura vegetal.</b> .....	19
<b>1.2</b> <b>Aspectos climáticos.</b> .....	21
<b>1.3</b> <b>Aspectos geomorfológicos.</b> .....	21
<b>1.4</b> <b>Aspectos geológicos.</b> .....	22
<b>CAPÍTULO II</b> .....	24
<b>2</b> <b>Objetivos e procedimentos metodológicos.</b> .....	24
<b>2.1</b> <b>Objetivos.</b> .....	24
2.1.1 <b>Objetivos Gerais</b> .....	24
2.1.2 <b>Objetivos Específicos</b> .....	24
<b>2.2</b> <b>Procedimentos metodológicos.</b> .....	25
2.2.1 <b>Cadastramento de erosão em túneis na porção leste do município de Cascavel - PR</b> .....	25
2.2.2 <b>Levantamento topográfico</b> .....	25
2.2.3 <b>Cadastramento da erosão</b> .....	26
2.2.4 <b>Reconhecimento da distribuição dos materiais na encosta: caracterização física e mecânica</b> .....	26
2.2.5 <b>Abertura e construção de perfil geológico</b> .....	26
2.2.6 <b>Sondagens</b> .....	27
2.2.7 <b>Separação de unidades</b> .....	28
2.2.8 <b>Registro fotográfico das feições e mecanismos</b> .....	28

2.2.9	Instalação e monitoramento dos piezômetros.....	28
2.2.10	Monitoramento pluviométrico .....	30
2.2.11	Instalação de pluviômetro manual .....	30
2.2.12	Análises granulométricas.....	31
2.2.13	Densidade aparente e real e porosidade total.....	33
2.2.14	Levantamento bibliográfico .....	34
2.2.15	Elaboração de mapas e gráficos estatísticos .....	34
2.2.16	Elaboração dos croquis e desenhos auxiliados por <i>software</i> .....	35
2.2.17	Construção dos transectos .....	35
<b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>37</b>
<b>3</b>	<b>Cobertura superficial e processo de erosão em túneis. ....</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Solos.....</b>	<b>37</b>
3.1.1	Fatores de formação dos solos .....	38
<b>3.2</b>	<b>Formações superficiais.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3</b>	<b>Erosão em túneis (<i>piping</i>).....</b>	<b>41</b>
<b>3.4</b>	<b>Distribuição de água no subsolo.....</b>	<b>46</b>
3.4.1	Zona de aeração .....	46
3.4.2	Zona de saturação.....	47
<b>3.5</b>	<b>Aquíferos. ....</b>	<b>47</b>
<b>3.6</b>	<b>Reservas hídricas.....</b>	<b>48</b>
<b>3.7</b>	<b>Superfície potenciométrica.....</b>	<b>48</b>
<b>CAPÍTULO IV.....</b>		<b>50</b>
<b>4</b>	<b>O problema da erosão no âmbito local – Encosta Bazzotti.....</b>	<b>50</b>
<b>4.1</b>	<b>Processo de erosão em voçoroca. ....</b>	<b>53</b>

4.2	<b>Processo de erosão em túnel.</b>	54
4.3	<b>Características morfométricas da encosta.</b>	56
4.4	<b>Carta hipsométrica.</b>	57
4.5	<b>Conclusões parciais.</b>	59
<b>CAPÍTULO V</b>		62
5	<b>Distribuição e caracterização física da cobertura superficial.</b>	62
5.1	<b>Perfil geológico na cabeceira da incisão.</b>	63
5.2	<b>Transectos longitudinal e transversal.</b>	69
5.2.1	Transecto 1	69
5.2.2	Transecto 2	72
5.3	<b>Conclusões parciais.</b>	78
<b>CAPÍTULO VI</b>		80
6	<b>Piezometria da encosta.</b>	80
6.1	<b>O comportamento da oscilação do lençol freático.</b>	81
6.1.1	Análise da piezometria	81
6.2	<b>Variação de carga total e altura de água.</b>	82
6.2.1	Primeiro quadrimestre	82
6.2.2	Segundo quadrimestre	85
6.2.3	Terceiro quadrimestre	87
6.3	<b>Cálculos de gradientes e considerações dinâmicas.</b>	89
6.3.1	Gradiente hidráulico	89
6.4	<b>Conclusões parciais.</b>	91
7	<b>CONCLUSÕES.</b>	92
8	<b>REFERÊNCIAS.</b>	96

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo .....	18
Figura 2 – Afloramento de basalto média encosta, em 06/08/2011.....	23
Figura 3 – Túnel no Distrito de São João do Oeste, região Leste de Cascavel. Presença de morcegos no interior do túnel, em 06/08/2011 .....	23
Figura 4 - Esquema de piezômetro instalado no solo.....	29
Figura 5 - Aspectos da morfologia da encosta com ocorrência de túneis nos sedimentos Plio-Pleistoceno. (Basilicata, sul da Itália).....	44
Figura 6 - Média encosta. (A) Bacia de contenção de fluxo estabilizada pelo preenchimento de sedimentos da alta encosta (estrada que percorre a encosta Bazzotti). (B) Direção do fluxo para baixa encosta promovendo a incisão de ravinas e alcovas de regressão nas laterais da estrada devido à falta de contenção do fluxo.....	51
Figura 7 - (A) e (B) direção do fluxo superficial da estrada promovendo a incisão na área de reflorestamento (ravinamento). (C) ravina parcialmente preenchida por serapilheira. (D) alcova de regressão.....	52
Figura 8 - Paredes expostas após ocorrer movimento de massa translacional, (A) fendas de contração; (B) cavidades circulares parcialmente preenchidas; (C) desprendimento de placas; (D) movimento de massa translacional na lateral direita da voçoroca.....	53
Figura 9 - (A) Evolução do túnel a partir de desprendimento de placas das laterais e do teto. (B) Deposição de sedimento na entrada do túnel provocado pelo fluxo de exfiltração da encosta. (C) Depressões no teto na forma de alvéolos. (D) Escala (aracnídeo).....	55
Figura 10 - Carta hipsométrica da Encosta Bazzotti.....	58
Figura 11 - Ampliação do túnel a partir de desprendimento de placas da parede auxiliada pelas raízes e/ou ação gravitacional e pela incisão fluxo concentrado, em 06/08/2011.....	61
Figura 12 - Concentração de partículas de minerais pesados transportadas depositadas às margens de estrada rural.....	63
Figura 13 - Exposição do regolito, em destaque desembocadura do túnel, em 06/08/2011.....	64
Figura 14 - Perfil de solo na lateral do túnel e suas características .....	68
Figura 15 - Análise da transecto 1 e distribuição granulométrica.....	71

Figura 16 - Análise do transecto 2 e distribuição granulométrica .....	75
Figura 17 - Entrada do túnel parcialmente entulhado. Em destaque zona de exfiltração (olho d'água), em 18/03/2008 .....	79
Figura 18 - Gráfico apresentando as variações de cargas de pressão e a distribuição da precipitação no primeiro quadrimestre.....	84
Figura 19 - Gráfico apresentando as variações de cargas de pressão e a distribuição da precipitação no segundo quadrimestre.....	86
Figura 20 - Gráfico apresentando as variações de cargas de pressão e a distribuição da precipitação no terceiro quadrimestre .....	88

### **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Classes de declividade da encosta.....	56
Quadro 2 - Subdivisão das unidades.....	65
Quadro 3 - Resultado das análises granulométricas T5 .....	69
Quadro 4 - Resultado das análises granulométricas T3 .....	70
Quadro 5 - Resultado das análises granulométricas T2.....	72
Quadro 6 - Resultado das análises granulométricas T4.....	74
Quadro 7 - Resultado das análises granulométricas T6.....	76
Quadro 8 - Resultado das análises granulométricas T7 .....	77
Quadro 9 - Períodos de análise de cargas totais e dias correspondentes aos valores de cargas máximas e mínimas.....	81
Quadro 10 - Gradientes hidráulicos entre os pontos selecionados de cada dia de carga piezométrica máxima e mínima dos três quadrimestres. Os gradientes não têm dimensão, mas expressam, neste caso a variação de carga total (em centímetros) ao longo de distâncias horizontais.(em centímetros).....	90

### **TABELA**

Tabela 1 - Ocupação vegetal da encosta .....	20
--	----

## **RELAÇÃO ENTRE COBERTURA SUPERFICIAL E PIEZOMETRIA EM ENCOSTA COM PROCESSO DE EROÇÃO EM TÚNEIS E VOÇOROCA NO LESTE DE CASCAVEL (PR)**

A erosão em túneis é uma forma específica de erosão subterrânea. A área de estudo está localizada no município de Cascavel, no distrito de São João do Oeste. O enfoque dos trabalhos teve como objetivo compreender a relação entre cobertura superficial e piezometria em encosta com processo de erosão em túneis e voçoroca. As técnicas empregadas na pesquisa foram construção de perfil geológico e de transectos. Empregou-se também o monitoramento da piezometria associado com a pluviometria para compreender o comportamento de parâmetros hidrológicos da encosta. Os resultados indicaram que o material que recobre a encosta, apresenta textura areno-argilosa. As propriedades texturais permitem a ampliação do túnel, a Unidade 3 do perfil é a que favorece a maior circulação de água na encosta. As unidades superiores são as mantenedoras dos níveis piezométricos da encosta. O desenvolvimento do túnel está intrinsecamente relacionado aos fatores hidrológicos, topográficos e de constituição e distribuição dos materiais superficiais da encosta, os quais propiciam a instalação e evolução dos mecanismos de erosão subsuperficial. Portanto, os fatores que contribuem para a instalação e evolução do túnel na encosta Bazzotti expressam a dinâmica direta na evolução da voçoroca, a qual molda o relevo ao longo dos anos.

**Palavras-chave:** cobertura superficial, erosão subsuperficial, túnel, piezometria.

## **RELATIONSHIP BETWEEN SURFACE AND COVERAGE IN PIEZOMETRIC ENCOSTA PROCESS WITH EROSION AND TUNNELS IN THE EAST OF RATTLESNAKE GULLY (PR)**

The tunnel erosion is a specific form of de subterranean erosion. The study area is located in the municipality of Cascavel, in district of São João do Oeste. This work has objective to know the relation between surface coverage and the piezometric in slope with gullye and tunnel erosion processes. The thecniques used were elaboration of geologic profile and transects. It was used also monitoring the piezometric data associated with rainfall to understand the behavior of hydrological parameters of the slope. The results indicated that the material that covers the slope has sandy-clay. The textural proprieties contribute to the expansion of the tunnel; the Unit 3 is the layer that promotes largest circulation of water in slope. The upper units are the keepers of the piezometric levels of the slope. The development of the tunnel is intrinsically related to the hydrological, topographical and kind and distribution of the surface materials in slope, which provide the installation and development of subsurface erosion mechanisms. Therefore, the factors that contribute to the genesis and evolution of the tunnel into the Bazzotti slope express the dynamics in the evolution of the gully, which molds the relief over the year. The study area is located Rattlesnake, in the district of St. John West d. The focus of the work aimed at understanding the relationship between surface coverage and piezometric in slope erosion process in tunnels and gullies. The techniques used in the research were constructing of the geological profile and transects. It was used also monitoring the piezometric associated with rainfall to understand the behavior of hydrological parameters of the slope.

**Keywords:** cover surface, subsurface erosion, tunnel, piezometric data

## INTRODUÇÃO

As formações superficiais compreendem os materiais que recobrem as encostas, referentes à sua litologia. Elas são comumente designadas como regolito ou manto de intemperismo que recobre a rocha sã ou substrato, sendo, em geral, fracamente ou não consolidadas. Podem ser de natureza autóctone (eluvial) ou alóctone (DELVIGNE, 1981).

As formações superficiais alóctones compreendem materiais transportados e intemperizados que recobrem o substrato geológico sem, no entanto, resultar de sua alteração *in situ*, sendo comumente denominados de colúvios (DELVIGNE, 1981).

Neste trabalho foi reconhecido o carácter autóctone dos perfis trabalhados, principalmente pela preservação das feições estruturais herdadas da rocha.

Dentre os mecanismos mais atuantes na erosão de solo, os túneis proporcionam o principal mecanismo de erosão subsuperficial, promovendo grandes remoções de materiais. De acordo com Dunne (1990) os túneis são geralmente relacionados às diferenças texturais de sequência litoestratigráficas ou de horizontes pedológicos estruturais. A erosão de subsuperfície pode carrear quantidade variável de material: seixos, serrapilheira e agregados, partículas de frações variadas.

Para compreender estes mecanismos optou-se em trabalhar na encosta Bazzotti, situada na região leste de Cascavel (PR), onde ocorre incisão de túnel na região basal de uma voçoroca. Este por sua vez favorece no alívio de carga freática (local de exfiltração) da encosta, conhecida popularmente com olho d' água.

Sendo assim, o objetivo geral desta pesquisa consiste em reconhecer e caracterizar a relação entre cobertura superficial e piezometria na encosta Bazzotti com processo de erosão em túneis e voçoroca no leste de Cascavel (PR).

Para conhecer os parâmetros que influenciam no desenvolvimento do túnel optou-se em reconhecer a distribuição da cobertura superficial na área de estudo, promovendo a instalação de piezômetros, o qual tem como objetivo compreender a



flutuação piezométrica no setor da encosta adjacente do túnel em resposta da precipitação registrada na área, e determinar as propriedades texturais e a composição granulométrica dos materiais presentes na encosta.

Dessa forma, o presente trabalho está subdividido em seis capítulos. No primeiro capítulo procurou-se caracterizar a história e a geografia de Cascavel e da encosta Bazzotti, demonstrando os aspectos climáticos, geomorfológicos e geológicos da encosta em questão. O segundo capítulo foi evidenciado os objetivos gerais e específicos e os procedimentos metodológicos que foram utilizados em campo, laboratório e gabinete.

O terceiro capítulo possui a discussão teórica sobre formação de solos e formações superficiais, os fatores de formação e evolução distinguindo-os pelo caráter autóctone e alóctone, enfatizando o processo de erosão em túneis relacionando às pesquisas internacionais com as pesquisas nacionais.

No quarto capítulo buscou relacionar o problema da erosão no âmbito local, enfatizando o processo de erosão em voçoroca e túneis, também relacionando os aspectos morfométricos da encosta Bazzotti.

O quinto capítulo apresenta a distribuição e caracterização física da cobertura superficial na área, apresentando o perfil geológico e os transectos longitudinal e transversal da encosta com suas distribuições granulométricas.

No sexto e último capítulo é apresentado os resultados do monitoramento do fluxo do lençol freático da encosta, o qual ocorreu a partir da instalação dos piezômetros, que possibilitou determinar o nível do freático e sua correlação com os níveis pluviométricos.

## CAPÍTULO I

### 1 CARACTERIZAÇÃO HISTÓRICA E GEOGRÁFICA DE CASCAVEL E DA ÁREA DE ESTUDO

A região, antes ocupada pelos espanhóis, teve como primeiros habitantes os índios Caingangues. Uma nova ocupação ocorreu a partir de 1730, com o tropeirismo. A área atual teve seu povoamento iniciado a partir do final da década de 1910, por colonos caboclos e descendentes de imigrantes eslavos. O primeiro povoado denominado “Encruzilhada” surgiu em março de 1928, com a instalação do primeiro pioneiro José Silvério de Oliveira, conhecido como “Nhô Jeca”, arrendou terras do colono José Elias, o primeiro habitante do povoado, construindo o seu armazém, o que proporcionou a chegada de novas pessoas, que traziam ideias e investimentos. A Vila foi oficializada pela prefeitura de Foz do Iguaçu em 1936, com a denominação de Cascavel (PORTAL DO MUNICÍPIO DE CASCAVEL, 2012).

Na década de 1930, o ciclo da madeira atraiu grande número de famílias de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, em especial os colonos poloneses, alemães e italianos, que juntos formaram a base populacional da cidade (PORTAL DO MUNICÍPIO DE CASCAVEL, 2012).

Em meados de 1979, a família Bazzotti adentrou o município em busca de terras férteis para a produção de alimentos, vindos do Rio Grande do Sul, com vasta experiência no cultivo de cereais (milho, trigo, soja) e criação de bovinos e suínos. Buscaram terras a leste de Cascavel, no distrito de São João do Oeste, onde compraram glebas de terra da fazenda São Domingos que pertencia a uma antiga madeireira da região. Esse grupo de produtores foram os primeiros a empregar a técnica do plantio direto na região, adquirindo a primeira plantadeira destinada ao plantio direto, o que beneficiou não somente os lucros com a produção mais também a manutenção de toda a matéria orgânica e estrutura do solo, evitando com isso perdas de solo pela erosão superficial que ocorria pelo sistema convencional de plantio.

A área de estudo escolhida para este trabalho é uma encosta localizada dentro da propriedade da família Bazzotti, distante aproximadamente 27 km do trevo Cataratas,

principal acesso a cidade. A encosta foi intitulada como “encosta Bazzotti” pelo fato de pertencer à família Bazzotti desde 1979, isso facilita a identificação da encosta afetada por túneis pela comunidade, pois a mesma não possuía denominação anteriormente a esse estudo que facilite a sua localização, no entanto, a família é popularmente conhecida na região. As coordenadas da área são: latitude  $25^{\circ}00'37''\text{S}$  e longitude  $53^{\circ}11'51''\text{W}$ , possui no topo da encosta altitude de 824 m e na média encosta no setor onde está o túnel, a altitude é de 775 metros em relação ao nível do mar (Figura 1).

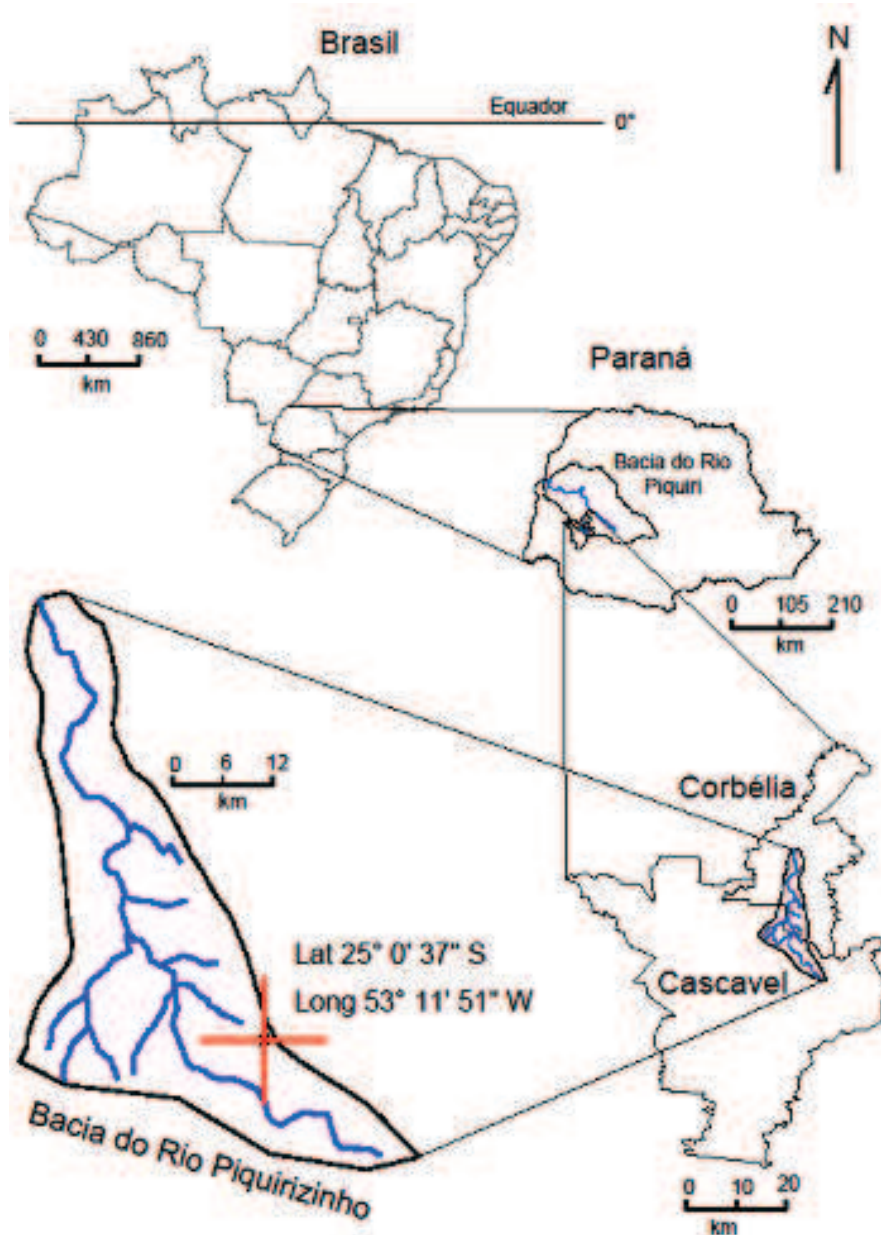


Figura 1 – Localização da área de estudo

Fonte: IBGE, 2004.

Org: Bazzotti, D. M.; Castro, R. 2012.

A encosta possui rampa de aproximadamente 338,33 m, com declividade de 12% (área destinada à lavoura) e com 16% no local do túnel, em sua porção basal podem ser encontradas mata residual e pastagem, enquanto a média e a alta encosta são destinadas à agricultura mecanizada intensiva, nesta mesma área predomina plantio direto em curva na prática das culturas de soja, milho, trigo e aveia.

O túnel está a quatro metros de profundidade interligado a voçoroca, sendo que o mesmo possui nascente d'água em seu interior com fluxo constante de água, mesmo em períodos mais secos. A erosão na voçoroca está bastante ativa decorrente da evolução do túnel, e também pela convergência de fluxos superficiais oriundos da alta encosta em consequência das estradas rurais possuírem bacias que não retêm as águas pluviais.

### **1.1. IDENTIFICAÇÃO DA COBERTURA VEGETAL**

De acordo com Canto *et al.* (2010) o bioma Mata Atlântica e seus ecossistemas associados abrangem área de 1,1 milhão de km<sup>2</sup> (13% do território brasileiro). Porém, em séculos de destruição ambiental, a área florestal foi reduzida a apenas 300 mil km<sup>2</sup> altamente fragmentados. Esse bioma é composto por diversidade de formações florestais, como floresta ombrófila (densa, mista e aberta), mata estacional semidecidual e estacional decidual, manguezais, restingas e campos de altitude associados e brejos interioranos no Nordeste. As florestas com Araucária (ombrófila mista) ocorrem nos planaltos da região Sul situado a oeste da Serra do Mar (CANTO *et al.* 2010).

A Floresta Subtropical predominava em toda Região Oeste Paranaense e que compreendia a maior floresta original do sul do Brasil, no entanto, a cobertura vegetal da região de Cascavel - PR atual está quase totalmente modificada devido ao extrativismo e a agropecuária (BORDIGNON, 2004).

Veloso *et al* (1991) salienta que o pinheiro-do-Paraná (*Araucária angustifolia*) ocupava cerca de 70% do Planalto Meridional, segundo o mesmo autor na década de 80 não apresentava mais expressão fitogeográfica e econômica, sendo que agora apresenta uns poucos indivíduos isolados em pontos inacessíveis ou no meio a grandes culturas de soja, milho e trigo. A região Leste de Cascavel, onde foi desenvolvida a pesquisa,

encontra-se o maior refúgio desta vegetação, ainda que muito degradada, esse tipo de formação compreende a Floresta Subtropical Ombrófila mista o qual o Pinheiro do Paraná encontra-se presente.

Na encosta em estudo a área com vegetação arbórea mais representativa está localizada na margem direita da nascente compreendendo Floresta Subtropical Ombrófila Mista, no entanto, sem a presença de Araucárias devido à exploração predatória de madeira ocorrida na década de 1970 para a implantação da agricultura mecanizada nesta região de Cascavel.

A margem esquerda da nascente é ocupada por estreita faixa de mata ciliar em estágio de regeneração, onde encontram-se espécies exóticas de gramíneas, exemplo do Capim Brizantão (*Brachiaria brizantha cv.*) e Capim Elefante (*Pennisetum purpureum* Schumach), e margeando a mata ciliar há também espécies exóticas de árvores como eucalipto (*Eucalyptus grandis*) destinado para o comércio de madeira. Ainda neste setor da encosta, adjacente a mata ciliar a área é destinada a pecuária, contribuindo para fixação de gramíneas na área restrita a mata ciliar para proteção da nascente.

O eixo de drenagem da encosta converge para a mata residual e pastagem, isso ocorre, pois neste local a uma tríplice divisa de lotes, tornando-se uma área frágil e suscetível à erosão superficial devido à conexão de descarga pluvial da estrada na alta encosta. A ocupação da encosta está sintetizada na tabela 1 Tabela 1.

Tabela 1 - **Ocupação vegetal da encosta**

<b>Setor</b>	<b>Uso e ocupação vegetal</b>
<b>Alta encosta</b>	agricultura mecanizada intensiva (soja; milho; aveia; trigo)
<b>Média encosta</b>	mata residual / pastagem (gado de corte)
<b>Baixa encosta</b>	pastagens / mata residual / reflorestamento (eucalipto)

## 1.2. ASPECTOS CLIMÁTICOS

Segundo Cruz (2007) adotando-se da classificação de Köppen o clima de Cascavel é classificado como Cfa, o qual constitui clima subtropical úmido (mesotérmico) é definido como temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e sem estação seca definida, embora apresente tendência de concentração das chuvas nos meses de verão.

Os meses de inverno apresentam maiores probabilidades de ocorrências de geadas no período de Junho a Setembro, a média de temperatura nesse período é inferior a 16°C, sendo que no mês mais quente as máximas superam 30°C com a média anual de precipitação pluvial de 2011 mm (SILVA, 2002).

Ao analisar as cartas climáticas do Paraná do IAPAR, (1994), demonstram que a temperatura mínima no trimestre mais frio (Junho, Julho e Agosto) é de 15°C a 16°C, e máximas no trimestre mais quente (Dezembro, Janeiro e Fevereiro) estão entre 26°C a 27°C.

## 1.3. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

A região de Cascavel está inserida na unidade geomorfológica do Paraná denominada de Terceiro Planalto, sustentado por derrames basálticos do magmatismo Serra Geral.

A subdivisão dessa região é caracterizada como Unidade Morfoescultural do terceiro planalto na subunidade de Planalto de Cascavel que apresenta dissecação média e ocupa uma área 4.824,80 km<sup>2</sup>. A classe de declividade predominante é de 12% (ATLAS GEOMORFOLÓGICO DO ESTADO DO PARANÁ, 2006).

Em relação ao relevo apresenta gradiente de 540 m com altitudes variando entre 260 metros (mínima) e 800 metros (máxima). As formas predominantes são topos alongados e aplainados, vertentes convexas e vales em “V”, modeladas em rochas efusivas da Formação Serra Geral (ATLAS GEOMORFOLÓGICO DO ESTADO DO PARANÁ, 2006).

#### 1.4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

No âmbito geológico, predominam em Cascavel rochas vulcânicas básicas da Formação Serra Geral (Grupo São Bento), que deram origem à cobertura pedológica de textura argilosa a muito argilosa. Esta formação consiste de derrames basálticos continentais (*Continental Flood Basalts*), que formam uma das grandes províncias ígneas do mundo (SAUNDERS *et al.* 1992). Conforme Silva *et al.* (2003) a sucessão de derrames compreende aproximadamente de 1.500 m de espessura junto ao depocentro da bacia e estende-se por uma área de 1.200.000 km<sup>2</sup>.

Trabalhos realizados em campo na Formação Serra Geral por Waichel *et al.* - (2006) no setor Oeste do Paraná possibilitou a comprovação de derrames do tipo Pahoehoe, associados com derrames maciços na porção superior da Formação Serra Geral. Estes derrames Pahoehoe ocorrem na forma de fluxos compostos, formados por múltiplos lobos (0,5-2,0 m de espessura) e como fluxos simples com até 35 m de espessura.

Segundo Waichel (2006) a organização da estruturação dos derrames no Oeste do Paraná é subdividida em três zonas, crosta inferior, núcleo e crosta superior, típicas de lavas Pahoehoe. Na crosta superior são frequentes feições de superfície tipo cordas. Da mesma forma Wilmouth e Walker (1993) salienta que os derrames Pahoehoe são predominantemente compostos por lobos do tipo P (*pipes*), os quais são gerados por baixas taxas de erupção em superfícies com um baixo ângulo de inclinação. De forma generalizada, os constituintes da Formação Serra Geral são basaltos toleíticos e andesitos basálticos, ocorrendo menores quantidades de riolitos e riodacitos (MILANI *et al.* 2007).

De acordo com Silva *et al.* (2003) as concentrações da sequência toleítica bimodal que predominam rochas básicas de basaltos a basalto andesitos, somam mais de 90% seu volume, e superpostos por rochas ácidas os riolitos e riodacitos que somam mais de 4% em volume.

Há afloramento de rocha (Figura 2) na média encosta, o mesmo está no limite da estrada com a lavoura, acima da mata residual, em geral, aflora na forma de matacões.

A textura é afanítica com estrutura vesicular e com fendas preenchidas por material silicoso. A cor apresentada neste setor é avermelhada.



Figura 2 – Afloramento de basalto média encosta, em 06/08/2011

A erosão em túneis se destaca no âmbito local, grandes cavidades ocorrem dispersas nas encostas da área (Figura 3). Medidas mitigadoras são empregadas pelos proprietários de terra para conter o avanço da erosão, sendo a principal delas, preencher as incisões com matacões e blocos. Em alguns casos os proprietários isolam a área e preenche completamente a embocadura dos túneis para fazer a captação da água para suas casas, porém, a qualidade desta água está comprometida, devido alguns túneis apresentarem outras conexões, permitindo a entrada de animais, na figura 3, observa-se a presença de morcegos no interior do túnel.



Figura 3 – Túnel no Distrito de São João do Oeste, região Leste de Cascavel. Presença de morcegos no interior do túnel, em 06/08/2011  
Fotografia: Wellington Barbosa da Silva, 2011.



## **CAPÍTULO II**

### **2. OBJETIVOS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Neste capítulo serão apresentados os objetivos e as técnicas aplicadas na pesquisa.

#### **2.1. OBJETIVOS**

##### **2.1.1. Objetivos Gerais**

Identificar a relação entre cobertura superficial e piezometria em encosta com processo de erosão em túneis e voçoroca no leste de Cascavel (PR).

##### **2.1.2. Objetivos Específicos**

Identificar as propriedades texturais, densidade real, aparente e porosidade total dos materiais que recobrem a encosta;

Levantar as propriedades morfométricas do túnel na encosta, tais como: profundidade; diâmetro; comprimento, feições erosivas;

Construir topossequências longitudinais e transversais ao eixo de drenagem da encosta;

Compreender a flutuação piezométrica do freático no setor da encosta adjacente do túnel em resposta da precipitação registrada na área de estudo.

## **2.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

### **2.2.1. Cadastramento de erosão em túneis na porção leste do município de Cascavel - PR**

#### **2.2.2. Levantamento topográfico**

O levantamento topográfico foi efetuado através de caminhamento e uso de receptor GNSS L1/L2 Leica modelo RX900CS número de série 160602, antena ATX900 CS Pole. Para tratamento dos dados utilizou-se os *softwares* Leica Geo Office (LGO<sup>®</sup>), AutoCAD<sup>®</sup>, Posição e Datageosis.

Para o levantamento topográfico utilizou-se o sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que engloba o GPS (*Sistema de Posicionamento Global*). De acordo INCRA (2010) o posicionamento por GNSS permite a determinação de coordenadas a partir de vértices do Sistema Geodésico Brasileiro ao vértice de referência do georreferenciamento (C1) e determinação de coordenadas dos vértices de poligonais de apoio (C2), os quais garantem a qualidade e a tolerância horizontal e vertical.

O método utilizado seguindo o sistema GNSS foi o do posicionamento relativo estático rápido, o qual determina que se mantenha um ou mais receptores coletando dados na estação de referência enquanto o(s) outro(s) receptor(s) percorre(m) as estações de interesse. Segundo o INCRA (2010) não há necessidade de continuidade de rastreamento durante o deslocamento entre uma estação e outra, no entanto a norma determina que o tempo de ocupação do ponto varie entre 5 a 30 minutos para que o receptor reconheça os satélites visíveis.

O trabalho foi efetuado para mapear a encosta com erosão em túneis, o qual buscou-se levantar os parâmetros como: área de contribuição de drenagem, forma e declividade da encosta, contorno e profundidade da voçoroca formada a partir do túnel, juntamente com o georreferenciamento dos pontos de sondagens e por consequência dos piezômetros. O levantamento foi efetuado pelo técnico florestal Luiz André Pizzatto - Crea - PR 87413/TD.

### **2.2.3. Cadastramento da erosão**

O cadastramento consiste no levantamento sistemático das características morfométricas da erosão nas feições presentes, e levantamento das características da encosta. Para o levantamento foram usadas tripé profissional Trip 28 Paverpank com dois niveladores de prumo; câmera superzoom DSC – HX200V (GPS e bússola inclusas); trenas horizontais e verticais e formulário próprio.

### **2.2.4. Reconhecimento da distribuição dos materiais na encosta: caracterização física e mecânica**

Efetuaram-se sondagens em diferentes pontos da encosta para reconhecer o tipo, a espessura e a distribuição dos materiais ao longo da encosta, e, posteriormente, construiu-se transectos transversais e longitudinais e seção geológica em solo exposto. Com isso, efetuaram-se análises de campo e de laboratório para caracterização da granulometria, seguindo a metodologia proposta pela EMBRAPA (1997) e reconhecimento das propriedades do solo que possam favorecer a instalação ou avanço da erosão.

### **2.2.5. Abertura e construção de perfil geológico**

Compreende-se perfil do solo a seção vertical que, partindo da superfície aprofunda-se até onde chega à ação do intemperismo, mostrando uma série de camadas dispostas horizontalmente denominadas de unidades. O perfil representa o resultado da influência dos vários fatores que concorrem para a formação do solo, refletindo assim o histórico de sua evolução (VIEIRA, 1975).

Para Vieira (1975) a formação e desenvolvimento do perfil podem ser explicados através da ação dos diversos agentes formadores do solo tais como: clima, organismos, relevo, tempo e dentre elas estão o material de origem em resposta às novas condições ambientais, como, baixas ou altas temperaturas, pressão e presença d'água sofrem a ação dos agentes intempéricos físicos ou químicos.

A limpeza da seção foi efetuada primeiramente com a delimitação de um metro de largura pelo comprimento total do perfil. A construção de perfil foi efetuada na cabeceira da voçoroca formada por colapso de parte do túnel. Procurou-se minimizar qualquer perturbação entre camadas no momento da limpeza. Com a janela limpa as principais unidades foram individualizadas para melhor visualização dos componentes presentes, nos quais a textura, plasticidade, umidade, concreções entre outras características significativas eram identificadas. Ao todo foram recolhidas 12 amostragens para análises, após efetuou-se a descrição e a coleta das amostras para tratamento e análise em laboratório.

Com os referentes dados transcritos em papel, efetuou-se a transferência dos dados para o computador, utilizando o scanner para geração de imagem no formato JPG, permitindo o reconhecimento do arquivo pelo software do AutoCad® - (*computer aided design*), ou seja, desenho auxiliado por computador.

#### **2.2.6. Sondagens**

Os trabalhos de sondagem foram realizados nos dias 24 e 25 de setembro de 2011, quando efetuaram-se seis sondagens com trado Holandês, totalizando 94 amostragens para as análises granulométricas. Foram selecionados locais que abrangessem o entorno superior do túnel, pois além das sondagens foi realizada a instalação dos piezômetros nos mesmos lugares para monitoramento do nível freático da encosta.

Para a realização das sondagens foram utilizados dois trados Holandeses com as profundidades máximas de cinco e sete metros. Os procedimentos era padrão para ambos, a cada 20 cm recolhiam-se amostragens para descrição do material em campo. As propriedades observadas foram registradas em formulário próprio destacando principalmente a textura, umidade, plasticidade, mosqueamentos, transições e cor. Os materiais recolhidos foram armazenados em sacos plásticos e etiquetados para controle. As sondagens eram interrompidas quando o material tornava-se muito plástico, denso ou coeso impossibilitando a retirada do trado, ou quando encontrava o saprolito, ou chegava-se ao limite de perfuração do equipamento.

### **2.2.7. Separação de unidades**

O procedimento adotado para a individualização das unidades buscava a identificação de aspectos morfológicos das amostras, as quais apresentavam plasticidade, umidade, texturas visíveis em campo notavam-se também a sua fração granulométrica e traços de concreções possivelmente ocorridas por lixiviação do material.

Os valores obtidos dos percentuais das amostras foram da classe textural predominante areno-argilosa. Essas classes foram determinadas pelo diagrama triangular de classificação de sedimentos de acordo com a granulométrica proposta por Shepard (1954).

### **2.2.8. Registro fotográfico das feições e mecanismos**

Para o melhor entendimento e compreensão em gabinete das feições e mecanismo ocorridos na área de estudo, utilizou-se o registro fotográfico para montar um arquivo cronológico, possibilitando a visualização e a forma que ocorre os processos em campo.

Os equipamentos utilizados para esses registros foram as câmeras Samsung SL 202 com 10.2 mega pixels e câmera superzoom Sony DSC - HX 200V com 18.2 mega pixels. A escolha de usar dois equipamentos foi necessária, pois, havia locais de difícil acesso, não permitindo adentrar a câmera DSC - HX 200V da Sony, optou-se então em usar a câmera Samsung SL 202 nesses locais, pois, o seu tamanho possibilita a captura de imagens internas de algumas estruturas, devido isso algumas imagens não possuem escala padronizada, a escala usada nesse tipo de imagem são escalas naturais (aracnídeos, borboletas entre outros).

### **2.2.9. Instalação e monitoramento dos piezômetros**

A instalação dos piezômetros teve como objetivo determinar o nível do freático e sua correlação com os níveis pluviométricos, suas principais vantagens eram a fácil

montagem e execução do experimento, possibilitando o uso de materiais simples e de baixo custo.

Para instalação dos piezômetros, utilizou-se 22,49 metros tubos de PVC reciclados com diâmetro de 40 mm (1"1/4), em 5 tradagens, além da tubulação foram necessários areia e pedra brita para fazer o filtro de sustentação da base do cano e preenchimento das laterais do mesmo. Para a conexão das hastes de PVC utilizou-se adesivo plástico para tubos e conexões soldáveis, após isso, empregou-se ranhuras na base do cano (50 cm). O esquema representando o furo de tradagem e o piezômetro está representado na figura 4.

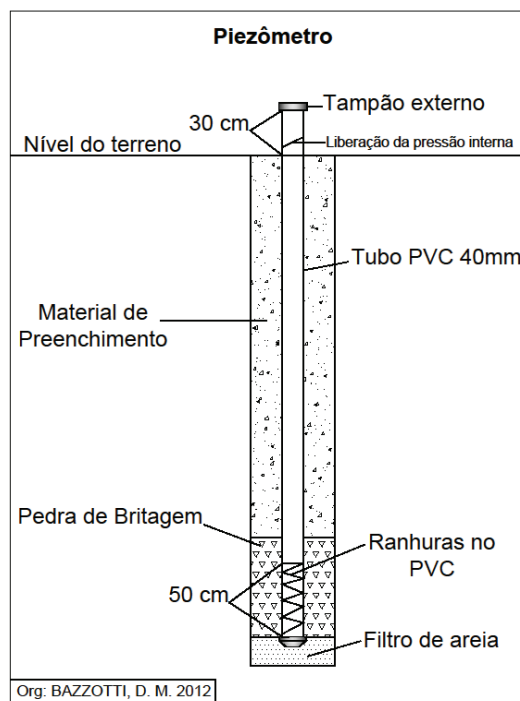


Figura 4. Esquema de piezômetro instalado no solo

Em torno das ranhuras colocou-se o filtro de areia e pedra brita para impedir a entrada de partículas de solo, a pedra brita preenche as ranhuras para possibilitar a passagem de água sem sedimentos. O restante do furo foi preenchido com material misto entre areia e pedra de britagem. Na superfície, a entrada do cano deve ser fechada com tampão do cano de PVC, foi necessário deixar 30 cm de cano exposto para facilitar a verificação diária do nível, além disso, empregou-se uma pequena ranhura para liberação da pressão interna do cano possibilitando o nível freático oscilar.

Para o monitoramento diário foi empregada técnica simples de fácil manejo, utilizando linha de nylon (tipo pesca) presa numa rolha de cortiça, a qual era lançada no cano, ao chegar ao nível do lençol ela flutua sobre a lâmina de água possibilitando medir o nível. A medição foi através do metro articulado utilizado por pedreiro, normalmente com um metro de comprimento, após a medição anotava-se em formulário próprio.

O monitoramento dos piezômetros permitiu a compreensão do comportamento do fluxo do nível freático, levando em consideração o volume de chuvas ocorridos num determinado período (horas, dias, meses ou anos).

#### **2.2.10. Monitoramento pluviométrico**

A utilização da estação meteorológica *Nexus Weather Station*, teve como principal objetivo registrar a pluviosidade da área de estudo. Este equipamento foi cedido pelo Laboratório de Geologia da Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO.

O equipamento foi instalado no último trimestre de 2011 para recolher somente dados referentes à pluviosidade da área de estudo, mas, o aparelho apresentou falhas eletrônicas no primeiro período de janeiro de 2012, não registrando os dados completos deste mês, isso se repetiu por meses consecutivos impedindo o controle da pluviosidade de forma automática. Como a área de estudo está localizada na zona rural de Cascavel, ocorre frequentes interrupções de energia provocada pelas intempéries, o que possivelmente provocou o desligamento temporário do equipamento, ocasionando perda de dados da memória. Como alternativa foi instalado de imediato o pluviômetro manual, o qual era feita a leitura diariamente.

#### **2.2.11. Instalação de pluviômetro manual**

O pluviômetro é um dispositivo que se destina a registrar a quantidade de precipitação ocorrida em um determinado espaço de tempo. Este equipamento é produzido com plástico cristal e PS (*poliestireno - termoplástico duro*) do tipo cunha, possui graduação de 0 a 130 mm com divisão de escala na ordem de 2,5 mm, a área de

captação do pluviômetro é de 15 cm<sup>2</sup>. Este equipamento permite fazer a leitura direta sem a necessidade de proveta graduada.

Para instalação do equipamento foi necessário escolher um local descampado com distância mínima de 20 metros de obstáculos. Para instalação e fixação do pluviômetro utilizou-se uma estaca de 1,50 de altura, onde foi fixado uma base para anexar o pluviômetro no topo deixando 5 cm do pluviômetro acima desta base, foi utilizado parafusos de rosca soberba para possibilitar o encaixe rápido do aparelho, permitindo a retirada do equipamento para liberação do volume armazenado. Os dados recolhidos deste equipamento serviram para relacionar as médias de pluviosidade com os dados dos piezômetros que demonstram os níveis de pressão piezométrica na circulação de água em subsolo.

A proposta em recolher esses dados era acompanhar os níveis piezométricos da encosta Bazzotti, com isso, correlacionar as médias diárias de chuvas com os níveis freáticos da encosta.

No pluviômetro a leitura era efetuada pela altura total de água acumulada no recipiente, sendo que seus registros eram sempre fornecidos em milímetros por dia. Os dados pluviométricos foram recolhidos diariamente as 08h00min e anotados e formulário próprio, na sequência dos 12 meses, iniciou-se no dia 01 de outubro de 2011 e finalizou-se no dia 30 de setembro de 2012.

#### **2.2.12. Análises granulométricas**

O uso deste procedimento laboratorial teve como finalidade, individualizar, através dos resultados, as unidades do solo e/ou sedimentos que compõem o solo. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Geomorfologia Aplicada da Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO, seguindo rotina convencional de separação de sedimentos grossos via peneiramento e os finos por via úmida e posterior o processo de pipetagem (EMBRAPA, 1979).

No total foram 1 perfil vertical com 12 amostras, mais 6 tradagens efetuadas com trado Holandês, com 94 amostras totalizando 106 amostragens. A rotina do



laboratório determinava retirar 50 gramas de amostra. Este material foi secado em temperatura de 65° C por 24 horas para perda de umidade e destorroado para ser lançado sobre um conjunto de peneiras sobrepostas de 1.75 mm, 1.0 mm, 0.50 mm, 0.250 mm e 0.125 mm, que foi submetido a agitador mecânico por 15 minutos.

O material retido em cada peneira foi pesado e o resultado anotado em formulário próprio. O material que não ficou retido nestas peneiras foi depositado em recipiente de plástico imerso em uma solução de 25 ml de água oxigenada (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 3%, para a queima de material orgânico, facilitando a dispersão das partículas. Após 24 horas foi colocado o líquido dispersante composto por 25 ml de hidróxido de sódio (NaOH) 5% e 25 ml de água destilada, que após agitadas por 10 minutos com bastão de vidro, permaneceram em repouso por 16 horas. Depois desse período, o material foi transferido para a peneira com abertura de 0,053 mm para a lavagem com água destilada.

O material retido na peneira foi colhido em placa de petri e levada à estufa para secagem em temperatura de 105° C. Posteriormente foi pesado e o resultado anotado em formulário próprio. O material fino que passou pela malha desta peneira foi depositado em proveta de 1000 ml, para que procedesse a rotina de pipetagem. Para o trabalho de coleta em solução aquosa o ambiente estava em 20°C. Com a temperatura estabilizada e baseando-se na lei de Stokes, da velocidade de decantação, foi efetuado o cálculo do tempo necessário para coleta de partículas na fração silte. Os tempos foram: 58seg (silte grossa), 3mim52seg (silte média), 7mim44seg (silte fina), 31mim (silte muito fina). O material contido nas provetas foi agitado para então dar-se início a contagem do tempo necessário para a coleta. No tempo estipulado retiraram-se quatro amostras, a primeira pipeta mergulhou-se na profundidade de 20 cm em seguida as três pipetagens restantes na profundidade de 10 cm. O material retirado foi depositado em becker de 50 ml, após sendo encaminhado para a estufa a qual promove a secagem na temperatura de 105°C. Após secas, as amostras foram pesadas, e os valores anotados em formulário próprio, e transferido para planilha do *Microsoft Office Excel*®.

Esta planilha eletrônica, previamente programada para esta função, efetuou os cálculos de frequência simples e acumulada de cada amostra, assim como fornece histogramas de distribuição granulométrica na escala  $\phi$ . De acordo com Suguio (1973) a

análise granulométrica fornece dados que podem ser agrupados em três classes granulométricas (areia, silte e argila).

### 2.2.13. Densidade aparente e real e porosidade total

Para as análises de Densidade aparente ( $D_a$ ), Densidade real ( $D_r$ ) e porosidade total, o método utilizado fundamentou-se na rotina proposta pela EMBRAPA (1997) a qual fundamenta-se no uso de um anel de aço com bordos cortantes (anéis de *Kopeck*) com capacidade interna conhecida.

A densidade aparente ( $D_a$ ) pode ser definida como a relação entre a massa da amostra de solo seca a 105°C por durante 48h (terra fina seca ao ar) a soma dos volumes ocupados pelas partículas e poros (volume do anel utilizado). A fórmula geral para obtenção da densidade aparente dos solos é:

$$D_a = m/v$$

Onde:

$D_a$  = Densidade aparente

$m$  = massa do solo

$v$  = volume (poros+terra)

A Densidade real ( $D_r$ ) é a relação existente entre a massa de uma amostra e o volume ocupado pelas suas partículas sólidas. Para a determinação é necessário obter-se o valor da massa da amostra e depois o volume dos sólidos presentes. A massa dos sólidos é obtida por simples pesagens, enquanto que o volume dos sólidos é determinado pelo método do balão volumétrico.

O método do balão volumétrico para a determinação do volume consiste em colocar 20g de amostra seca e destorroada dentro de um balão volumétrico e completá-lo com álcool etílico absoluto até 50 ml. Os cálculos de  $D_r$  são:

$$D_r = m/(V_b - V_a)$$

Onde:

$D_r$  = Densidade real

$m$  = massa da amostra

$V_b$  = volume do balão volumétrico (50 ml)

$V_a$  = volume de álcool gasto para completar o balão volumétrico.

A porosidade do solo pode ser definida como o volume de vazios do solo. A fórmula utilizada para a obtenção da porosidade é:

$$\% P = (D_r - D_a) 100 / D_r$$

Onde:

P = Porosidade

$D_r$  = Densidade real

$D_a$  = Densidade aparente

As análises de densidade real, aparente e porosidade total foram realizadas no Laboratório de Geomorfologia Dinâmica e Aplicadas da Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO.

#### **2.2.14. Levantamento bibliográfico**

A busca por referenciais bibliográficos foi atividade contínua na pesquisa, desta forma possibilitou a melhor compreensão dos processos erosivos em túneis no Brasil e no mundo.

O referencial internacional consultado nesta pesquisa teve como objetivo de compreender as variações dos mecanismos de atuação no processo de erosão em túneis. As referências internacionais visavam abranger várias pesquisas desenvolvidas em diferentes países tais como: Itália, China, França, Portugal, Inglaterra e Estados Unidos da América. Alguns artigos consultados fizeram parte da construção teórica do trabalho e outros contribuíram para o entendimento do autor.

#### **2.2.15. Elaboração de mapas e gráficos estatísticos**

A elaboração e síntese dos dados são primordiais para a compreensão de fatores atuantes em campo, para isso ocorrer geraram-se mapas com o intuito de promover o agrupamento dos dados recolhidos no decorrer do trabalho. Os mapas possibilitaram deixar a realidade mais palpável com representações cartográficas em formas de símbolos, com finalidade de remeter as formas reais em campo.

No entendimento estatístico a forma mais confiável de representar dados está diretamente relacionada a gráficos. Os diversos modelos gráficos possibilitam uma melhor visualização, análise e interpretação detalhada dos dados apresentado.

Neste trabalho foram utilizados os gráficos de linhas (ou de segmentos), o qual permite representar a evolução dos valores de uma variável no decorrer do tempo, e o gráfico de barras (ou de colunas) utilizado, em geral, para representar dados de uma tabela de frequências associadas a uma variável qualitativa.

#### **2.2.16. Elaboração dos croquis e desenhos auxiliados por *software***

A representação artística na forma de desenhos confeccionados em campo possibilitou registrar detalhes que não é possível visualizar em fotografias, características entre unidades com proporções reais podem ser transcritos pelo sistema de esboço, o qual permitiu mostrar a percepção das características do material analisado. Um croqui, portanto, não exige grande precisão, refinamento gráfico ou mesmo cuidados com sua preservação, diferente de desenhos finalizados. O que costuma ser mais importante nos croquis é o registro gráfico de uma ideia instantânea, através de uma técnica de desenho rápida e descompromissada.

Após a realização do croquis, foi transpassado o desenho para meio digital, possibilitando anexar os dados já identificados em campo para textos. Neste trabalho foi utilizado o *software* do AutoCAD 2012<sup>®</sup>, com objetivo final de arquivar digitalmente os detalhes do objeto de pesquisa o qual possibilitou a manipulação em outros programas.

O tratamento dos dados foi efetuado por softwares de visualização tridimensional, fornecendo a evolução do nível freático ao longo do tempo. O tratamento tridimensional foi realizado com o auxílio do aplicativo 3D Analyst do ArcGis de modo a gerar mapas.

#### **2.2.17. Construção dos transectos**

Para construção dos transectos foi necessário primeiramente analisar os aspectos da área de estudo e determinar os pontos de sondagens para cobrir os detalhes que a

encosta possa apresentar. Após ocorrer às sondagens com trado holandês com a descrição das amostras, faz-se a separação das unidades individualizando-as com as principais características das amostradas em campo como, textura, cor, plasticidade, umidade, estruturas presentes e algumas características gerais para identificar presença de raízes, carvão, mosqueamentos das amostras, concreções ferruginosas e perdas de argilas. Outros dados utilizados para construção da topossequência foram às análises granulométricas, Densidade real, Densidade aparente e Porosidade Total, pois, constituem dados que aumentam na individualização das unidades.

## CAPÍTULO III

### 3. COBERTURA SUPERFICIAL E PROCESSO DE EROÇÃO EM TÚNEIS

Na sequência é apresentada discussão teórica sobre formação de solos e formações superficiais, os fatores de formação e evolução distinguindo-os pelo caráter autóctone e alóctone. Ao final deste capítulo são apresentadas discussões sobre o processo de erosão em túneis relacionando às pesquisas internacionais com as pesquisas nacionais.

#### 3.1. SOLOS

A gênese dos solos decorre de processos físicos, químicos e biológicos que transformam os materiais inalterados, minerais ou orgânicos que lhe dão origem. Tem-se dessa forma “pedogenese” – do prefixo e sufixo gregos: “*pedon*” = solos + “*genesis*” = criação, portanto, formação ou criação de solos (FERRAZ *et al.*, 2008).

O solo é identificado geralmente como a camada superficial da crosta terrestre, estando na interface da atmosfera, hidrosfera e geosfera. É um recurso vital, dinâmico, com propriedades físicas, químicas e biológicas distintas, constituído por partículas minerais de diferentes tamanhos, matéria orgânica, água, ar e organismos vivos (RODRIGUES; DUARTE, 2003).

Os solos são considerados corpos naturais que cobrem partes da superfície terrestre. Têm propriedades que se devem ao efeito integrado da ação do clima e dos organismos sobre o material original que vai sendo sujeito a alterações ao longo do tempo (SOIL SURVEY STAFF, 1997).

Para Botkin e Keller (2005) o solo refere-se ao material particulado composto em parte por rocha exposta à erosão e outros minerais, e ainda por matéria orgânica parcialmente degradada, que cobre grande parte da superfície terrestre da terra.

Segundo EMBRAPA (2009) o solo representa intrincada rede de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, e formados por matérias

orgânicas e minerais que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais da Terra. Recobrimo as encostas, observam-se seções aproximadamente paralelas, essas chamadas de horizontes ou camadas que se diferenciam do material original, isso por fatores de adições, perdas, translocações e transformações de energia e matéria. As alterações pedológicas dos materiais do solo revelam contraste com o substrato rochoso ou seu resíduo pouco alterado, demonstrando diferenciações pedológicas aos materiais pré-existentes.

### **3.1.1. Fatores de formação dos solos**

Os solos refletem as condições ambientais a que estiveram submetidos ao longo do seu processo de desenvolvimento pedogenético, isso através da morfologia e atributos físicos, químicos e mineralógicos. A formação dos solos ocorre em função de cinco fatores principais: material de origem, relevo, clima, tempo e organismos.

Para Jenny (1941), o material que da origem ao solo pode ser sedimentar de caráter aluvial (depósito de rio) ou coluvial (depósito de material no sopé das elevações) ou simplesmente de uma rocha matriz; isso confere a diversidade de constituintes minerais passíveis de transformação. Segundo Jenny (1980) os diferentes tipos de rocha e de materiais a partir dos quais um solo pode se desenvolver exercem importantes influências nas suas características físicas e químicas.

Segundo Tavares (2008) o clima é o fator que mais contribui para o intemperismo das rochas, pois determina o tipo e a velocidade do intemperismo em uma dada região, constitui como fator ativo, pois promove energia e matéria, exercendo ação modificadora no material de origem. De acordo com Muggler *et al.* (2005) os dois parâmetros climáticos mais importantes são a precipitação e a temperatura, regulando a natureza e a velocidade das reações químicas. Para que as reações químicas de intemperismo ocorram, é necessário que exista água no sistema. Dessa forma, a água está envolvida diretamente no processo, como solvente e, indiretamente, favorecendo a instalação de seres vivos que irão acelerar o intemperismo. Os elementos do clima que exercem maior influência nos processos de pedogênese para Oliveira (1972) são: temperatura, precipitações pluviométricas, ventos, deficiência e excedentes hídricos.

Os organismos no processo de formação de solo são compreendidos como os vegetais, animais, bactérias, fungos e líquens, os quais têm influências dinâmicas na formação do solo. Para Souza (2006), as bactérias, fungos, protozoários, nematoides (microfauna), cupins, minhocas, formigas (mesofauna) e tatus (macrofauna) são alguns dos principais organismos vivos presentes no solo que atuam como agentes pedogenéticos. Estes organismos exercem ações físicas e químicas sobre o material de origem e continuam a atuar no perfil do solo. Estas ações podem ser classificadas como conservadoras e transformadoras promovendo energia e matéria exercem ações modificadoras sobre o material de origem (MUGGLER *et al.*, 2005; TAVARES 2008).

O relevo é considerado um fator de controle, pois, sua ação se reflete sobre a dinâmica da água no sentido de infiltração e percolação dentro do perfil de solo. O relevo controla a partição da água que escoia superficialmente e a que infiltra no perfil do solo (TAVARES, 2008). Este fator busca a forma de limitar ou favorecer a penetração da água no perfil do solo, a variação do volume de água que percola pelo perfil afeta diretamente a eficiências dos fenômenos de hidratação, hidrólise e dissolução que ocorre durante a evolução do solo (OLIVEIRA *et al.*, 1992).

Para Muggler *et al.*, (2005), além do controle do fluxo de água, o relevo também exerce importante papel no controle da intensidade de insolação das encostas. Segundo Jenny (1980), em regiões montanhosas a orientação das encostas influencia significativamente na quantidade de radiação solar recebida, pois nas encostas mais sombreadas as temperaturas são menores, resultando em solos com morfologia e composição diferentes das encostas que recebem maior radiação solar.

Tavares (2008) expõe que o tempo (no aspecto cronológico) do intemperismo do solo concorre como fator passivo através do qual os fatores ativos, tais como clima e organismos atuam, dando origem aos solos da atualidade.

A relação entre o tempo e evolução dos solos causam dúvidas sobre a diferenciação entre a idade e maturidade da cobertura pedológica, diante disso, Oliveira (1972) e Oliveira (1992), salientam que alguns solos podem apresentar idade cronológica relativamente pequena e ao mesmo tempo serem considerados maduros ou evoluídos.



### 3.2. FORMAÇÕES SUPERFICIAIS

As formações superficiais compreendem os materiais que recobrem as encostas, referentes à sua litologia, ou seja, a base constituinte, quanto a espessura do material. Elas são comumente designadas como regolito ou manto de intemperismo que recobre a rocha sã ou substrato, sendo, em geral, fracamente ou não consolidadas. Outras denominações podem ser utilizadas tais como: perfil de intemperismo, manto de intemperismo ou de alteração. Podem ser de natureza autóctone (eluvial) ou alóctone (DELVIGNE, 1981).

Os perfis de solo desenvolvidos sobre o substrato rochoso, do qual resultam seus componentes materiais, estão associados às formações superficiais autóctones. As formações superficiais alóctones compreendem materiais transportados e intemperizados que recobrem o substrato geológico sem, no entanto, resultar de sua alteração *in situ*, sendo comumente denominados de colúvios (DELVIGNE, 1981).

De acordo com Campy e Macaire (1989) formações superficiais constituem em si o material que recobre parcialmente ou completamente o estrato rochoso, compreendendo baixa consolidação e espessuras variando de poucos decímetros a dezenas de metros. Estes materiais são de origem autóctone quando resultantes da degradação física e química do substrato que as sustentam, sendo denominados de alteritos autóctones ou para-autóctones; ou de natureza alóctone ou discordante, quando originadas de processos geológicos sedimentares ou vulcânicos (CAMPY; MACAIRE, 1989).

Para a compreensão destes materiais é importante estabelecer a diferenciação quanto a sua gênese e evolução, distinguindo-os sua origem autóctone ou alóctone (MENEZES *et. al.*, 2006).

Neste trabalho foi reconhecido o carácter autóctone dos perfis trabalhados principalmente pela preservação das feições estruturais herdadas da rocha.

O termo regolítico, segundo Pedron (2007) é oriundo dos antigos Regossolos e derivado de regolito do grego: rego (manto de alteração) lito (rocha), é uma camada de

material rochoso, macio e desagregado formado no local pela decomposição e desintegração das rochas situadas em profundidades.

Segundo Guerra e Guerra, (2001) o termo elúvio ou *eluvium* é compreendido como material de alteração formado *in situ* pelo intemperismo da rocha subjacente, que apesar de constituir o manto muito intemperizado quimicamente, ainda mantém a estrutura de origem da rocha.

Suguio (1998) apresenta como sinônimo de elúvio o termo alterita, cuja denominação é atribuída ao produto de alteração de quaisquer rochas que ainda preservam a estrutura original. Seu principal fator limitante de desenvolvimento é a ocorrência de transporte contínuo de material, sendo que, esses remobilizam tornando-se coluvial (CORRÊA, 2001).

### **3.3. EROSÃO EM TÚNEIS (*PIPING*)**

De acordo com Weggel e Rustom (1982); Vilar e Prandi (1983) e Nunes e Romão (2008) a erosão é tratada por processo de desagregação e carreamento de partículas de solo, resultante da ação de processos naturais como, precipitação, escoamento superficial, ventos e escorregamentos, bem como das atividades humanas que alteram a cobertura de proteção da superfície do terreno.

O mecanismo que mais influência na erosão pelas águas pluviais relaciona-se à desagregação das partículas constituintes do solo e seu arraste pelas águas do escoamento superficial difuso (BIGARELLA *et al.*, 1996).

Para Bertoni e Lombardi Neto (1999) a erosão é causada por forças ativas, como as características da chuva - precipitações, a declividade do terreno e a capacidade que tem o solo de absorver água – erodibilidade e por forças passivas como a resistência que exerce o solo de absorver à ação erosiva da água e a densidade da cobertura vegetal.

A erosão ocasionada na superfície depende muito do volume das chuvas e do escoamento superficial do terreno. Com o impacto da água da chuva agregados tendem a desmanchar, tornando-se menores e capazes de serem arrastados pelas águas. A estrutura do solo é formada por elementos de diversos tamanhos, que geram os

agregados, que por sua vez são unidos por coloides constituídos por matéria orgânica ou argila (BIGARELLA, MAZUCHOWSKI, 1985).

Para Lal (1988) a erosão acelerada dos solos coloca-se como um dos principais desencadeadores da degradação de terras, uma vez que contribui para a diminuição do seu potencial produtivo, bem como para o assoreamento e decréscimo da qualidade dos recursos hídricos.

A erosão em ravinas segundo Fournier (1960) ocorre devido à concentração do fluxo de água em caminhos preferenciais, arrastando as partículas e aprofundando os sulcos. O intersulco para Meyer *et al.*, (1975) é causado pelo escoamento superficial que pode ocorrer em lâmina de água de pequena espessura e extensão, concentrada pelos processos erosivos ou por marcas de cultivo.

Segundo Lima (2003), o escoamento concentrado, por sua vez, tem origem no fato de que as superfícies do terreno são, em geral, irregulares para produzir escoamento laminar uniforme. Assim sendo, há a formação de filetes ou pequenos sulcos, a partir do confinamento entre torrões do solo ou mesmo devido a um obstáculo que divide a corrente de água e provoca um turbilhão que escava uma cavidade, resultando numa incisão geral/retilíneo.

Segundo Pichler (1953) a formação das voçorocas no processo erosivo pode ser atribuída ou, à erosão superficial, ou ainda, mais comumente, a ação conjunta da erosão superficial e da subterrânea. Para Baccaro (1994) diversos processos, além da erosão causada pela água do escoamento pluvial, estão presentes nas voçorocas; dentre eles: o escoamento pluvial (lavagem superficial e formação de sulcos), erosão interna no solo (*piping*), solapamentos e escorregamentos dos solos. No interior de uma voçoroca pode haver surgências de água, que durante o ano são alimentadas pelo lençol freático.

Dentre os mecanismos mais atuantes na erosão de solo, os túneis proporcionam o principal mecanismo de erosão subsuperficial, promovendo grandes remoções de materiais. De acordo com Dunne (1990) os túneis são geralmente relacionados às diferenças texturais de sequência litoestratigráficas ou de horizontes pedológicos estruturais. A erosão de subsuperfície pode carrear quantidade variável de material: seixos, serrapilheira e agregados, partículas de frações variadas.

Dunne (1990) propôs o termo “*tunnel scour*” para enfatizar a diferença entre este processo e outras formas de erosão subterrânea, indicando que elas são controladas por condições geológicas e climáticas e determinam a formação de intrincada rede subterrânea de dutos. A erosão em túneis é uma forma específica de erosão subterrânea. Os dutos passam a constituir rotas preferenciais da água e são responsáveis por diversos mecanismos de erosão que eventualmente evoluem para canais em superfície, dando origem as ravinas e posteriormente a voçorocas.

A geração do processo evolutivo das formas de túneis evidência a origem de sistemas de cavernas ou dutos, a saída do fluxo confinado muitas vezes provoca a geração de alvéolos nas paredes dos túneis, também denominado de “alcovas de regressão” por estarem associadas à erosão remontante.

Hurst (1975) sustenta que a dissolução e remoção dos coloides constituem a principal forma de erosão associada à água de subsuperfície. Os sistemas coloidais importantes para o intemperismo são notadamente as suspensões nas quais a fase dispersa é matéria orgânica ou mineral e o meio dispersante é a água ou solução aquosa.

Piccarreta *et al.*, (2006) promoveu investigações de campo para identificação da influência das propriedades físico-químicas relevantes sobre os processos de erosão nas terras áridas de Basilicata, sul da Itália, onde duas áreas foram estudadas, Bradanica e a Bacia de São Arcanjo (Bacino di Sant'Arcangelo), o trabalho se concentrou nas características pedológicas, texturais, mineralógicas e geoquímicas dos terrenos ricos em argilas. Os autores observaram que em primeiro estágio as voçorocas são produzidas e ampliadas por uma rede de pequenos túneis na parte intermediária da encosta, numa segunda etapa, tem-se escoamento superficial canalizado, promovido por pequenos colapsos do teto. Neste caso a conexão dos túneis, aliada à dificuldade de infiltração de água no substrato, gera fluxo concentrado em subsuperfície promovendo o colapso da superfície ao longo da encosta (Figura 5).

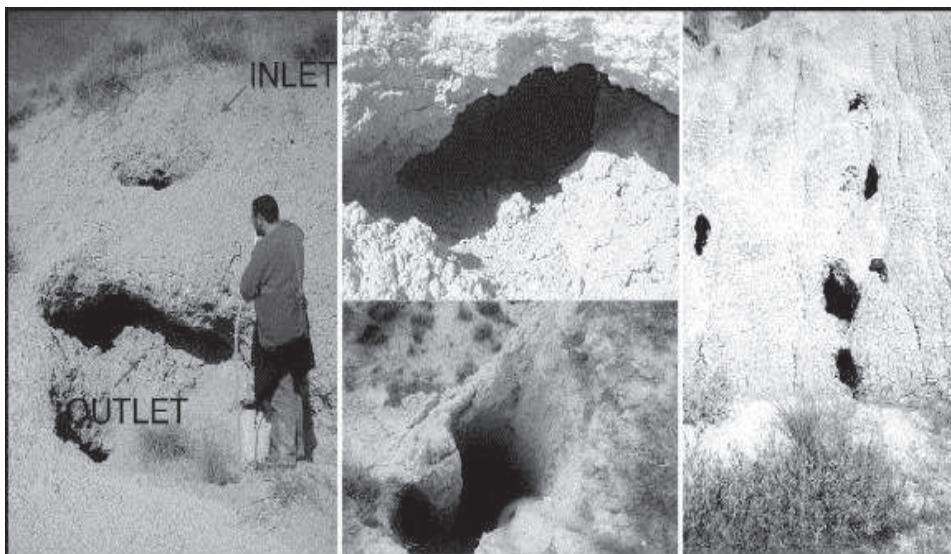


Figura 5 – Aspectos da morfologia da encosta com ocorrência de túneis nos sedimentos Plio-Pleistoceno. (Basilicata, sul da Itália).  
Extraído de Piccarreta *et al.* (2006).

Outro trabalho significativo foi desenvolvido por Zhu (2012) em região montanhosa, norte da China. O objetivo do estudo foi analisar as interações entre o desenvolvimento de voçorocas e erosão túnel. O local de estudo abrangeu uma área de aproximadamente 9,1 km<sup>2</sup>, onde identificou-se a conexão da erosão em túnel com o desenvolvimento e evolução de voçorocas nas cabeceiras. O autor concluiu que a erosão em túnel não ocorre associada às ravinas e canais fluviais efêmeros, salienta ainda que a conexão entre túneis e voçorocas está intrinsecamente afetada por condições topográficas e de uso da terra.

Trabalhos realizados na Grã-Bretanha por Jones *et al.*, (1997) sobre a distribuição dos túneis, a partir do estudo de levantamento de 74 bacias hidrográficas, sugerem que quase 30% da Grã-Bretanha é suscetíveis a erosão em túneis. Heterogeneidades nas propriedades do solo, dissecação e abertura de fendas podem ser as causas principais da ampliação dos túneis na Grã-Bretanha.

Os dutos ou túneis são responsáveis pelo transporte de grande quantidade de material em subsuperfície, e à medida que esse material vai sendo removido, ampliam-se os diâmetros desses dutos, podendo resultar no colapso do solo situado acima (GUERRA, 2001), a feição resulta no colapso que foi reconhecido por Rodrigues (1984) como estrutura de abatimento.

Segundo Jones (2004) há evidências que a erosão em túneis (*piping*) pode ter um efeito significativo sobre a resposta de vazão, qualidade da água e acidificação do solo. Jones (2004) salienta ainda que alguns dos efeitos da erosão em túneis, tais como o agravamento dos efeitos da chuva ácida e aumentos na taxa de resposta por fluxo concentrado pode atualmente ser consideradas negativas. Por outro lado, para o autor seus efeitos sobre a diversidade da paisagem são claramente positivos. A erosão em túneis (*piping*) é um processo natural e deve ser considerado como um elemento integrante no ajuste de equilíbrio da paisagem "natural". A presença de túneis pode alterar a área de contribuição dos fluxos na bacia hidrográfica e expandir significativamente a área de influência dentro do solo, provocando impacto sobre a resposta hidrológica e hidroquímica da bacia.

A ocorrência de dutos é atribuída a fatores tais como: gradiente hidráulico elevado, presença de íons solúveis no solo e ocorrência de períodos de seca prolongados, que favorecem a ocorrência de fissuras e chuvas intensas e irregulares que reativam percolação concentrada em subsuperfície (BULL; KIRKBY, 1997).

Ainda, entre os mecanismos de erosão associados aos fluxos d'água subsuperficiais estão incluídos erosão por vazamento (*seepage erosion*) – quando o fluxo de exfiltração atinge uma descarga crítica capaz de deslocar partículas do meio poroso; lavagem em túnel (*tunnel scour*) quando uma força cisalhante atua nas margens de um macroporo, originando independência do fluxo d'água promovendo sua lavagem interna (COELHO NETTO, 1994).

Camargo (1998) indica que a erosão em túneis ocorre na maioria das vezes associada com erosão em voçorocas, numa mesma encosta podem funcionar ativos a voçorocas e os sistemas de estruturas de abatimento, às vezes podendo funcionar de forma independente.

Uma vez formados, “os túneis passam a constituir rotas preferenciais de fluxo de água de subsuperfície e são responsáveis por diversos mecanismos de erosão que eventualmente evoluem para canais em superfície” (CAMARGO, 2005).

### **3.4. DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NO SUBSOLO**

A água em seu incessante movimento na atmosfera e nas camadas mais superficiais da crosta percorre desde o mais simples até o mais complexo dos caminhos.

Segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2002) quando ocorre uma precipitação, uma parte da água infiltra através dos espaços vazios que há no solo e nas rochas, ou mesmo pela ação da força da gravidade, esta água vai percorrendo até não encontrar mais espaços, começando então a movimentar-se horizontalmente em direção às áreas de baixa pressão, a única força que se opõe a este movimento é a força de adesão das moléculas de água sobre as superfícies dos grãos ou das rochas por onde penetra.

O processo de exfiltração sugerido por Dunne (1990) demonstra que quando o lençol d'água intersecta a superfície, a água drenará para fora do sistema subterrâneo numa certa descarga, em direção aos pântanos, lagos, canais, etc.

#### **3.4.1. Zona de aeração**

É a parte do solo que está parcialmente preenchida por água, na qual ocorre na forma de películas aderidas aos grãos do solo, nesta zona de aeração se distinguem três regiões, das quais a zona de umidade do solo é a parte mais superficial, onde a perda de água de adesão para a atmosfera é intensa. A segunda região importante é zona intermediária, compreendida entre a zona de umidade do solo e a franja capilar, com umidade menor da franja capilar e maior do que na zona superficial do solo. A terceira e última região é a franja de capilaridade, pois, é a região mais próxima ao nível d'água do lençol freático, onde a umidade é maior devido à presença da zona saturada subjacente, a água existente nesta zona é denominada água capilar, originada do contato com a água do nível freático e que ascende devido a forças capilares (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2002).

### 3.4.2. Zona de saturação

É a região abaixo do lençol freático (nível freático) onde os poros ou fraturas da rocha estão totalmente preenchidos por água, esta zona saturada recebe uma recarga de água por meio da zona não saturada, que pode aumentar o volume de água estocada, elevando o nível do lençol freático. A velocidade do escoamento d' água subterrânea é muito lenta em comparação com os níveis de velocidade superficiais, segundo Cleary (1989) o fluxo subterrâneo mais rápido é da ordem de 1 m/dia, em relação a um rio de alta velocidade o valor é de 1m/s.

### 3.5. AQUÍFEROS

Segundo a Agência Nacional de Águas (2002), os aquíferos são corpos rochosos com propriedades de armazenar e transmitir as águas subterrâneas sendo caracterizados por parâmetros dimensionais de extensão, espessura e geometria os quais são condicionados pela geologia estrutural, estratigrafia e parâmetros hidrodinâmicos (transmissividade, armazenamento ou porosidade efetiva), dependentes dos padrões faciológicos, condições de recarga e descarga é de variáveis de estado que descrevem a situação do reservatório subterrâneo em cada instante (superfície piezométrica, qualidade, condições de exploração, etc).

De acordo com Agência Nacional de Águas (2002) as águas subterrâneas são realimentadas pelas infiltrações de águas de origem meteóricas. Essas águas fluem lentamente (mm/dia, cm/dia ou m/dia) pelos poros e ou fissuras/fraturas intercomunicantes das rochas, essa taxa de infiltração de água no solo depende de muitos fatores, entre os quais cita-se a porosidade, pois, é influenciada pela presença de argila no solo, solos com teores de argilas mais elevados promove a diminuição da porosidade não permitindo uma grande infiltração, os solos que possuem a cobertura vegetal tornam-se mais permeáveis do que solos desmatados. A inclinação do terreno promove em declividades acentuadas o escoamento rápido do fluxo, diminuindo o tempo de infiltração, e por último o tipo de chuva, pois, chuvas intensas saturam rapidamente o solo, ao passo que chuvas finas e demoradas têm mais tempo para se infiltrarem.



Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA 2002), há dois tipos de aquíferos que ocorre sobre pressão da água. Os aquíferos livres ou freáticos os quais permitem a pressão da água na superfície da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente, e os aquíferos artesianos onde a camada saturada está confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis, de forma que a pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele ponto, o que faz com que a água suba no poço para além da zona aquífera.

### **3.6. RESERVAS HÍDRICAS**

As reservas hídricas subterrâneas são divididas em três tipos entre as quais estão denominadas de reservas reguladoras ou renováveis, as reservas permanentes ou seculares e as reservas exploráveis.

De acordo com Castany (1968); Feitosa e Filho (2001) e ANA (2005) a reserva é a quantidade de água existente no sistema armazenado durante um período determinado, ou seja, o volume de água acumulado e mobilizado num aquífero em um determinado período de tempo por alimentação natural. Estas por sua vez segundo Castany (1968), promovem reservas reguladoras que estão ligadas as flutuações da superfície piezométrica e também alimentam e regularizam o escoamento das águas subterrâneas.

Para Formaggio (2007), estas reservas reguladoras estão diretamente relacionadas à variação climática, pois, a variação do nível freático depende das épocas de máxima e mínima precipitação, no entanto à variáveis na infiltração que devem ser consideradas tais como: tipo do solo, porosidade, capilaridade, permeabilidade entre outros.

### **3.7. SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA**

Para Monteiro (2003) o movimento da água ocorre somente com o potencial hidráulico diferencial ( $\Delta h$ ), no sentido do maior para o menor. Esse diferencial de potencial hidráulico é também chamado de perda de carga e representa a dissipação de energia pela resistência do meio a passagem do fluido. Segundo o mesmo autor o

potencial hidráulico assume um valor em cada ponto da superfície potenciométrica, representada pelo limite entre a zona saturada e não saturada em água.

Neste sentido Monteiro, (2003), salienta que a superfície potenciométrica é o lugar geométrico dos pontos que marcam as alturas potenciométricas, ou de energia mecânica da água de um aquífero, referenciados a uma dada profundidade (datum vertical), com isso, se as superfícies equipotenciais são verticais, o potencial ou carga hidráulica é o mesmo em qualquer ponto.

De acordo com Chaves e Silva (2008), o sentido do fluxo subterrâneo é um dos parâmetros mais importantes na avaliação de risco de contaminações das águas subterrâneas. Para a obtenção do sentido do fluxo é determinada a superfície potenciométrica de cada poço de monitoramento, medindo os níveis de água dos poços e correlacionando-os com as cotas altimétricas acima do nível do mar.

Segundo Monteiro (2003) o termo nível potenciométrico (freático ou piezométrico) é geralmente utilizado para definir a altura do nível de água em um perfil, e afirma que o seu conhecimento é indispensável para qualquer estudo da situação e dinâmica das águas subterrâneas.

Com a compilação dos resultados gerados dos poços de monitoramento o fluxo subterrâneo foi identificado pelos níveis potenciométricos, gerou-se o cruzamento de dados, para isso necessitou-se do entendimento dos processos que ocorre na encosta, verificados no decorrer dos próximos capítulos.

## CAPÍTULO IV

### 4. O PROBLEMA DA EROSÃO NO ÂMBITO LOCAL – ENCOSTA BAZZOTTI

A erosão superficial está entre os mais relevantes processos determinantes da degradação das terras na agricultura, o que torna necessário a adoção de práticas adequadas para controle dos processos envolvidos.

Um dos sistemas de controle de erosão adotado na agricultura brasileira a partir de 1970 é a construção de terraços, este sistema consiste na construção de uma estrutura transversal ao sentido do maior declive do terreno. Apresenta estrutura composta de um dique e um canal que tem a finalidade de reter e infiltrar o fluxo superficial, nos terraços em nível, ou escoar lentamente para áreas adjacentes, nos terraços em desnível as águas das chuvas.

Segundo EMBRAPA (1997) a função do terraço foi a de reduzir o comprimento da rampa, área contínua por onde há escoamento das águas das chuvas, e, com isso, diminuir a velocidade de escoamento da água superficial. Ademais, contribuindo para a recarga de aquíferos.

Na encosta Bazzotti o sistema de terraços foi adotado em conjunto com o manejo de plantio direto em curva, promovendo a retenção das águas pluviais pela infiltração no corpo do solo.

A erosão superficial ocorre em decorrência do escoamento das águas pluviais da estrada, estar interligada verticalmente aos dois eixos principais da encosta (Figura 6), a qual drena seu volume para baixa encosta, estes estão interligados a voçoroca provocando a ampliação devido o fluxo concentrado gerar alcovas de regressão na parte superior da incisão.

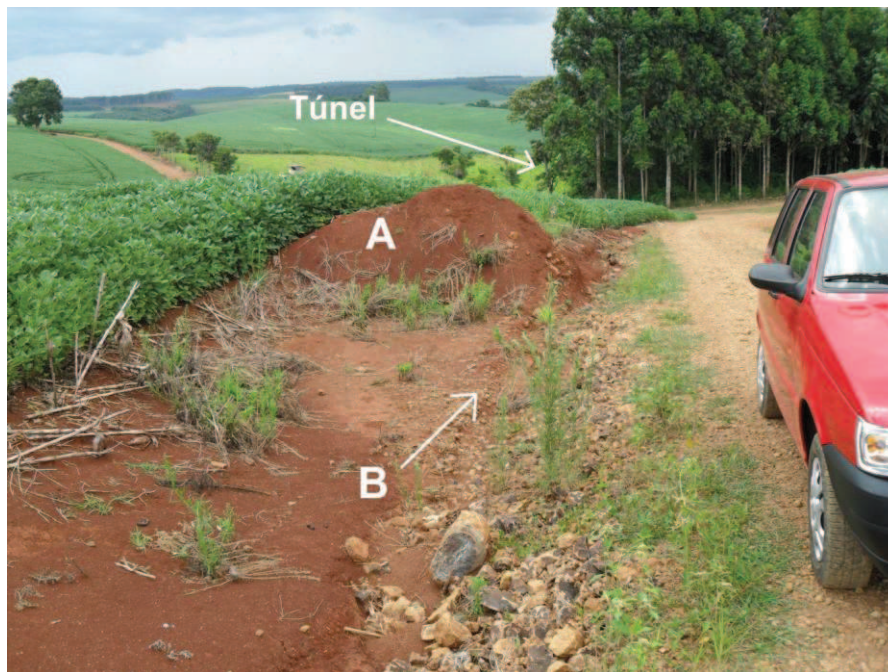


Figura 6 – Média encosta. (A) Bacia de contenção de fluxo estabilizada pelo preenchimento de sedimentos da alta encosta (estrada que percorre a encosta Bazzotti). (B) Direção do fluxo para baixa encosta promovendo a incisão de ravinas e alcovas de regressão nas laterais da estrada devido à falta de contenção do fluxo, em 20/01/2013.

Até 2008 o setor médio da encosta possuía quatro bacias de contenção do fluxo superficial, no entanto, essas bacias estão desativadas, pois tiveram seu potencial de retenção de fluxo comprometido pela não retirada dos sedimentos acumulados (Figura – A). O preenchimento destas bacias provocou a concentração do fluxo para baixa encosta (Figura – B), favorecendo a formação de ravinas e alcovas de regressão no setor da estrada e na área de transição entre o reflorestamento e a mata residual (Figura – C; D).

Na Figura 7 observam-se feições promovidas pelo fluxo da alta encosta que convergiu para o eixo. A velocidade do fluxo concentrado se elevou devido à inclinação do terreno (em média neste setor 12%) contribuindo para o aumento do poder erosivo a jusante.

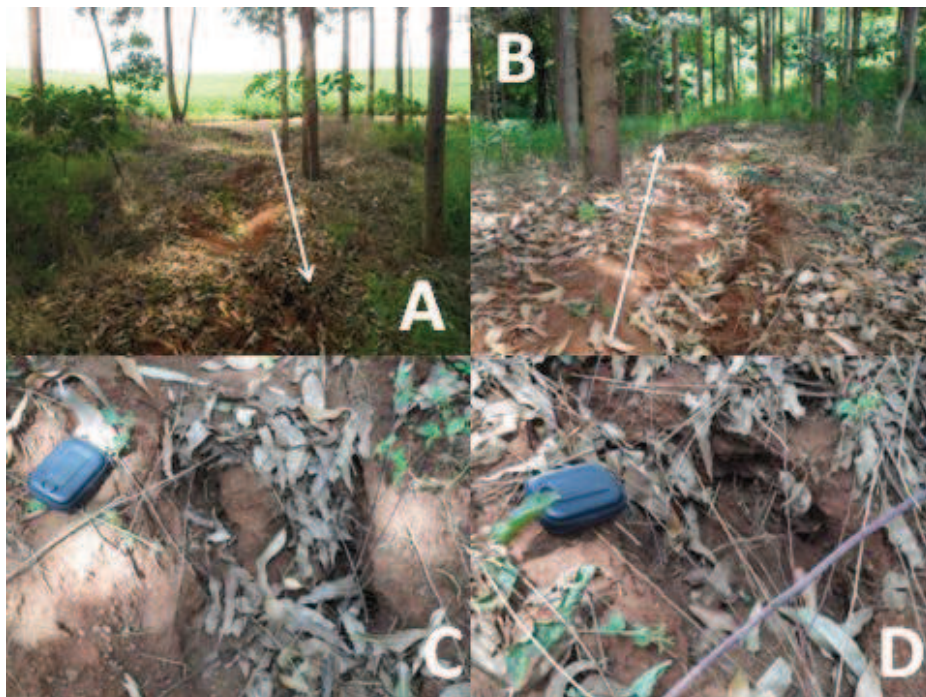


Figura 7 – (A) e (B) direção do fluxo superficial da estrada promovendo a incisão na área de reflorestamento (ravinação). (C) ravina parcialmente preenchida por serapilheira. (D) alcova de regressão, em 20/01/2013.

De acordo com os estudos promovidos por Ferreira (2005), no município de Nazareno (MG), estima-se que 60% da origem e evolução das voçorocas estão relacionadas principalmente com o escoamento das estradas rurais antigas.

Para eliminar ou minimizar esse processo o recomendável é a adequação da estrada, que possibilite a retenção do fluxo e permita a lenta infiltração. Segundo Camilo (2007), a adequação de estradas rurais é um conjunto de práticas que visa à recuperação, manutenção e conservação dos leitos naturais, pavimentados ou não, levando-se em consideração a sua integração com as áreas agrícolas. O objetivo é evitar a erosão do solo, a degradação do meio ambiente, a garantia de tráfego normal de veículos e o escoamento da produção agrícola durante todo o ano.

A situação constatada na encosta em estudo é a falta de contenção dos fluxos superficiais da estrada, gerando o agravamento e deterioração da estrada, elevando-se os custos de manutenção e potencializando a degradação da nascente onde está inserido o túnel.

#### 4.1. PROCESSO DE EROÇÃO EM VOÇOROCA

As voçorocas podem ser o resultado de erosão superficial, erosão subsuperficial e movimentos de massa (BACELLAR, 2006). Segundo o mesmo autor, o processo de desenvolvimento das voçorocas se dá, nos diferentes seguimentos das encostas, onde atuam diferentes mecanismos de erosão, ocorrendo pequenos deslizamentos rotacionais, o que acabará gerando fluxo de movimento de massa, mesmo após o período chuvoso.

A voçoroca da encosta Bazzotti, exibe paredes íngremes na parte superior e um canal estreito à jusante. A incisão é diretamente conectada a zona de exfiltração da encosta, o qual promove a saturação do material de base, o mesmo está entorno de 4 metros de profundidade, favorecendo ação da gravidade, pois as laterais possuem grau de inclinação elevado. Em épocas chuvosas o desprendimento de material das paredes da voçoroca assume proporções maiores, os movimentos de massa ocorridos no interior da voçoroca são caracterizados por movimentos translacionais, esse processo de evolução de encostas representa o mais frequente entre os tipos de movimento de massa, possuindo superfície de ruptura com forma planar, a qual acompanha, de modo geral, descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas existente no interior do material (Figura 8).

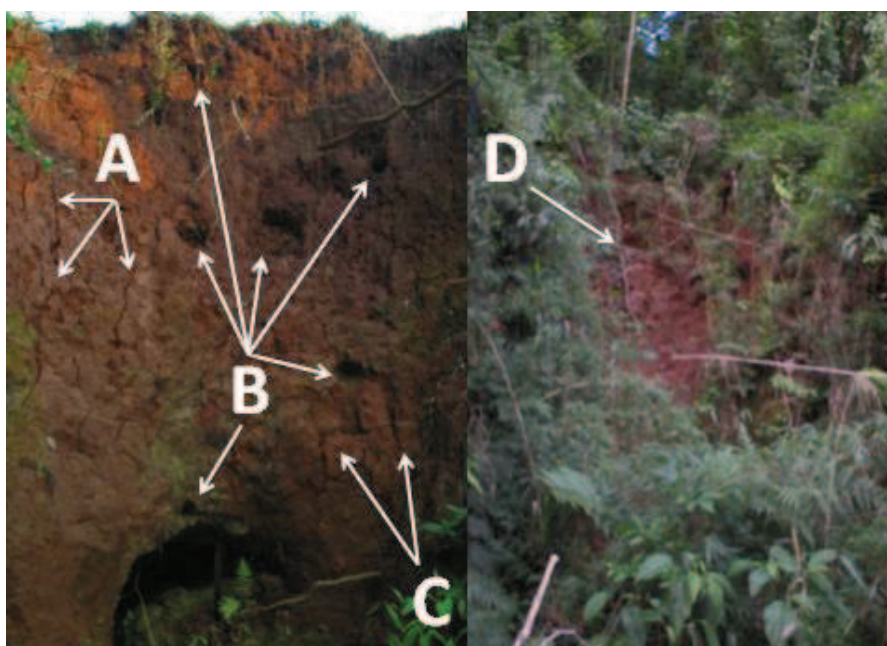


Figura 8 – Paredes expostas após ocorrer movimento de massa translacional, (A) fendas de contração; (B) cavidades circulares parcialmente preenchidas; (C) desprendimento de placas; (D) movimento de massa translacional na lateral direita da voçoroca, em 13/09/2007.

Após o movimento de massa ocorrer outro processo entra em ação, com a total limpeza da parede, torna-se mais susceptível ao ressecamento das unidades expostas, devido a incidência de raios solares, com a contração do material ocorre à abertura de fendas de dissecação (Figura 8 – A), estas fendas facilitaram o desprendimento de placas e blocos da parede da voçoroca, promovendo a sua ampliação lateral (Figura 8 – C).

Nesta mesma parede da voçoroca foi possível identificar cavidades circulares parcialmente preenchidas (Figura 8 – B), apresentando direção horizontal acompanhando a inclinação do terreno. Na figura 8 – D é evidenciado a ocorrência de movimento de massa translacional na lateral direita da voçoroca.

Na configuração atual, a voçoroca apresenta cabeceira mais ampla, evidenciando tendência ao alargamento no setor da montante, já a jusante apresenta características mais estruturadas. Trata-se de voçoroca conectada à rede de drenagem através do túnel e infiltração de água nas paredes da mesma.

#### **4.2. PROCESSO DE EROÇÃO EM TÚNEL**

Os fluxos de água subterrâneos convergem para zonas de menor potencial hidrométrico, promovendo uma diferença de energia que resulta na exfiltração da água subterrânea para a superfície (STRAHLER, 1992). A exfiltração é o principal responsável pela formação de nascentes, contribuindo para os fluxos dos canais juntamente com as águas pluviais que escoam nas vertentes (FEITOSA e MANOEL FILHO, 1997; FETTER, 1994).

Segundo Felipe e Magalhães Jr., (2012) as nascentes são elementos singulares, com uma complexidade hidrológica, geomorfológica e pedológica. Apresentam importância para a dinâmica hidrológica, pois marcam a passagem da água subterrânea para a superficial.

A erosão mecânica causada nas paredes do túnel propicia o aparecimento de feições, são depressões (alvéolos) que ampliam a área diametral da estrutura (Figura 9 -

C), formação essa com várias depressões onde a erosão efetiva ocorre na parte central para as bordas do alvéolo (ocorre por liberação do fluxo lentamente dos microporos).

O desprendimento de placas consiste em um mecanismo importante na evolução do túnel, torna-se o fator que potencializa a ampliação da estrutura (Figura 9 - B). Os sedimentos desprendidos do túnel promovem consecutivos represamentos do fluxo interno, conseqüentemente a saturação da base, onde gera pequenos movimentos de massa internamente devido a sustentação estar comprometida.

Com o aumento da umidade e a baixa luminosidade no interior do túnel há proliferação de fungos por toda a extensão diametral do mesmo. Ocorre em alguns setores à diminuição destes organismos, devido o desprendimento de placas (Figura 9 - A).

A fauna dentro do túnel é pouco variada ocorrendo baixa incidência de insetos no interior do duto, sendo possível identificar somente a comunidade dos artrópodes tais como: aracnídeos (aranhas), quilópodes: centopeias (lacraias), insetos (formigas, mosquitos e borboletas). Alguns desses artrópodes provocam reentrâncias no material, facilitando a ação dos processos erosivos (Figura 9 - D).

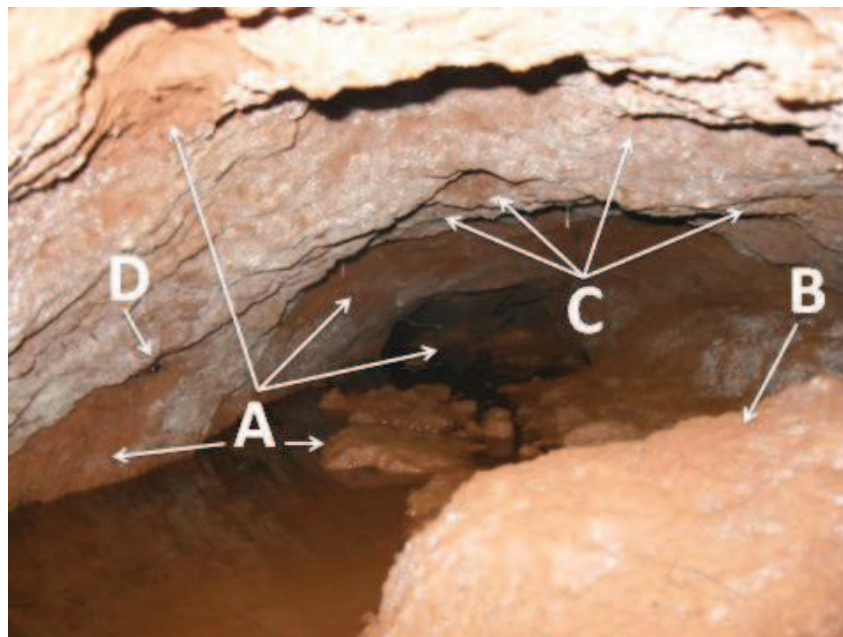


Figura 9 –(A) Evolução do túnel a partir de desprendimento de placas das laterais e do teto. (B) Deposição de sedimento na entrada do túnel provocado pelo fluxo de exfiltração da encosta. (C) Depressões no teto na forma de alvéolos. (D) Escala (aracnídeo), em 02/07/2011.



### 4.3. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DA ENCOSTA

A encosta Bazzotti possui comprimento total de 2.094 metros, sendo 338,33 m, do topo até a cabeceira da voçoroca, onde aflora o túnel. A declividade média é de 12% na área destinada à lavoura com 244,43 metros de extensão (mecanização da área agrícola pode ser praticada de maneira intensiva), e no setor mais baixo apresenta 16% de declividade abrangendo a área destinada a reflorestamento, a mata residual, pastagem e o túnel, totalizando 93,88 metros de extensão, a cota altimétrica é de 827 metros (topo) e 775 metros a jusante (local da incisão da erosão).

Segundo o Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná (2006), a subunidade morfoescultural denominada Planalto de Cascavel, onde está inserida a área de estudo apresentando declividade média entorno de 12%, em relação ao relevo, apresenta um gradiente de 540 metros com altitudes variando entre 260 (mínima) e 800 (máxima) as formas do relevo são caracterizados por topos alongados e aplainados, vertentes convexas e vales em “V”.

Segundo Guerra e Cunha (2004) a declividade é a informação básica de topografia utilizada nas metodologias de identificação de áreas potenciais ao processo de erosão, sendo que as classes que apresentam maior declividade têm maior probabilidade de apresentar processos erosivos (Quadro 1).

Quadro 1 – Classes de declividade da encosta

<b>Categorias</b>	<b>Percentagem</b>
Muito fraca	Até 6%
Fraca	6% a 12%
Média	12% a 20%
Forte	20% a 30%
Muito forte	Acima de 30%

Fonte: Guerra e Cunha, 2004.

Para Watson e Laflen (1986), a elevação da declividade da superfície do solo aumenta a erosão nas áreas entre sulco, embora não seja com o mesmo grau que ocorre na erosão em sulcos.

Para Bertoni e Lombardi Neto, (1999) a erosão é causada por fatores como as características da chuva, a declividade, o comprimento do declive do terreno, a capacidade que o solo tem de absorver água, reconhecidos pelo autor como forças ativas, e por forças passivas como a resistência que o solo exerce à ação erosiva da água e a densidade da cobertura vegetal.

De acordo com Oliveira (1990) encostas curtas e com maior declividade são favoráveis à incisão em canais por concentração de fluxo superficial hortoniano, ao passo que as encostas longas e com declividades menores tendem a determinar a evolução de voçoroca por fluxo subsuperficial.

No local onde a voçoroca está inserida a declividade média é de 16%, a convergência dos fluxos para esse local gera o entalhamento da encosta propiciando o avanço dos processos erosivos.

Dois processos erosivos foram fundamentais para o avanço da incisão: a erosão em túnel o qual ditou o ritmo de evolução de forma mais concisa, promovendo em alguns períodos grandes desprendimentos de material e a convergência dos fluxos superficiais oriundos da estrada a montante.

#### **4.4. CARTA HIPSOMÉTRICA**

A carta hipsométrica (Figura 10) permite caracterizar a topografia e individualizar com facilidade as unidades que compõe a área. A altimetria da encosta está compreendida entre 762 metros em sua foz a oeste-noroeste e no topo 826 metros porção leste-sudeste. A altitude média da encosta é de 794 metros.

Para a elaboração da carta hipsométrica, foram definidas 32 classes altimétricas. As classes foram definidas em intervalos iguais de 2 metros, visto que a amplitude altimétrica da área é de aproximadamente 896,35 metros. As classes altimétricas mínimas e máximas são 762 a 764 m e 824 a 826 metros.

Observam-se na figura 10 os dois principais eixos da encosta. Nestes locais foram instalados os piezômetros para monitoramento freático, onde os eixos convergem

para dentro da incisão da voçoroca, sendo locais que fazem a descarga do fluxo superficial da alta encosta em períodos de chuvas.

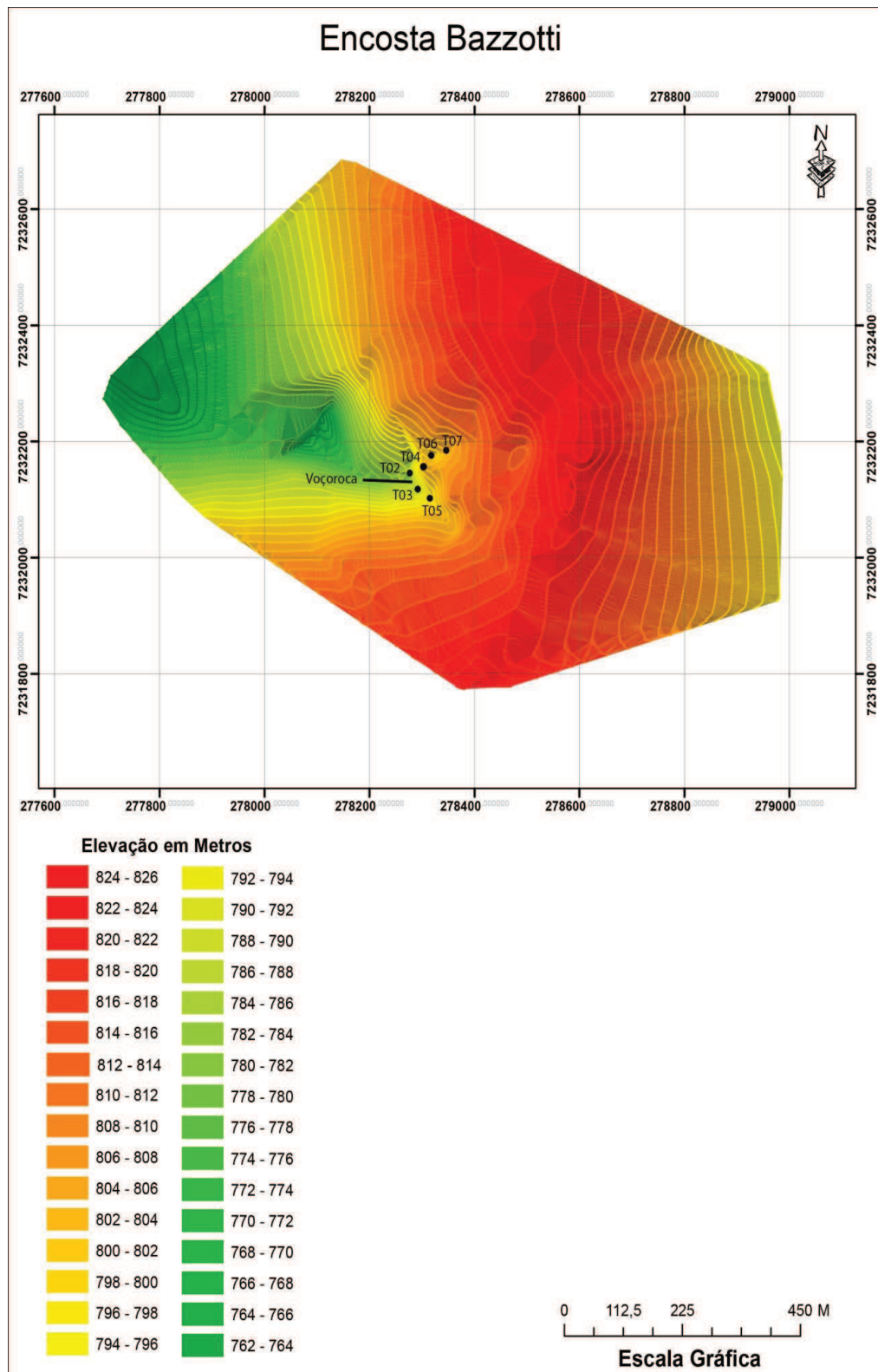


Figura 10 – Carta hipsométrica da Encosta Bazzotti

No setor acima da sondagem T7 entre a mata residual e a lavoura a um pequeno afloramento do basalto, apresenta-se dispersos por matacões.

Entre as altitudes 802 a 826 são locais destinados à agricultura, possuindo declividades em média 12% sendo menos acentuadas, permitindo o uso de maquinário agrícola.

Nas altitudes de 786 a 802, o setor é destinado a pastagens, devido à inclinação ser em média 16% dificultando o uso de maquinários agrícolas.

Entre 762 a 786, a utilização da encosta é de forma mista, pois, sua declividade é mais acentuada, parcialmente em alguns setores a presença de áreas de pastagens, mais, a predominância é de mata ciliar devido ao eixo principal de drenagem da encosta estar inserido neste patamar. Neste local ocorre surgências nas laterais da incisão, no entanto, devido a declividade não há locais alagadiços.

#### **4.5. CONCLUSÕES PARCIAIS**

A declividade média da encosta Bazzotti é de 12% na área destinada à lavoura com 244,43 metros de extensão, no setor mais baixo apresenta 16% de declividade abrangendo a área destinada a reflorestamento, a mata residual, a pastagem e o túnel, totalizando 93,88 metros de extensão, a cota altimétrica é de 827 metros (topo) e com 775 metros a jusante (local da incisão da erosão).

Em épocas chuvosas o desprendimento de material das paredes da voçoroca assume proporções maiores, os movimentos de massa ocorridos no interior da voçoroca são caracterizados por movimentos translacionais. Os alvéolos contribuem para ampliar as dimensões do túnel, pois interiormente o teto do túnel apresenta cavidades que se ampliam por ação da água que exfiltra nestes locais.

O desprendimento de placas é um mecanismo importante na evolução deste túnel, tornando-se o fator que mais contribui para ampliação da estrutura. Os sedimentos deprendidos do túnel promovem consecutivos represamentos do fluxo interno, conseqüentemente a saturação da base, onde promove pequenos movimentos de massa internamente devido a sustentação estar comprometida.

Para Bertoni e Lombardi Neto (1990) a cobertura vegetal é a defesa natural do solo contra erosão. A vegetação protege o solo do impacto da chuva, favorece a dispersão da água e a evaporação antes que atinja o solo. As raízes formam canais na terra permitindo uma melhor infiltração da água, melhoram o solo agregando matéria orgânica quando se decompõe. Assim aumentam a capacidade de retenção de água no solo e reduzem a velocidade da enxurrada.

As raízes são responsáveis pela fixação do vegetal ao solo além de absorver e servir de reservatório de nutrientes importantes para o desenvolvimento da vegetação. A quantidade de nutrientes absorvidos e reservados depende de propriedades das raízes, tais como o diâmetro e profundidade em que se encontra (ATKINSON, 1985 *apud* LEMES, 2001, p. 14).

Segundo Volk e Cogo (2008) a eficácia das raízes das plantas na redução da erosão hídrica pluvial do solo pode se manifestar de duas formas: a primeira diz respeito à ação mecânica exercida pelas plantas, fisicamente ligando as partículas de solo entre si e agindo como barreira ao livre movimento superficial de água e de solo; a segunda refere-se às substâncias orgânicas exsudadas pelas raízes vivas ou em processo de decomposição, as quais atuam como agente ligante no processo de aglutinação das partículas do solo, além de servirem de fonte de energia para os microrganismos que o habitam, resultando em melhorias na estrutura do solo, na capacidade para infiltrar água da chuva e resistir à erosão hídrica pluvial.

No entanto, as características encontradas neste túnel contrariam a bibliografia citada, em diversas partes do duto as raízes potencializam a dilatação do material, facilitando o desprendimento de placas ou agregados (Figura 11). Regiões onde há presença de raízes identificou-se a maior ocorrência de fendas, em oposição, locais onde não ocorrem as fendas a erosão foi provocada pelo escoamento concentrado por filetes no entorno das raízes, estes fluxos são constituídos lentamente pela liberação dos microporos, estas raízes atuam como condutor deste fluxo.



Figura 11 – Ampliação do túnel a partir de desprendimento de placas da parede auxiliada pelas raízes e/ou ação gravitacional e pela incisão fluxo concentrado, em 06/08/2011.

A adequação da estrada rural na encosta Bazzotti é uma das medidas complementares indispensáveis para o manejo da erosão e preservação do manancial. Os fatores que contribuem para a evolução da voçoroca na encosta Bazzotti expressam a dinâmica direta na evolução do relevo ao longo dos anos.

## CAPÍTULO V

### 5. DISTRIBUIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA COBERTURA SUPERFICIAL

A região Oeste do Paraná apresenta substrato rochoso composto por basalto e andesitos. O relevo está associado aos padrões de drenagem e suas densidades, que resultam em topografia com maior ou menor grau de dissecação (entalhamento), originando vertentes com formas, extensões e declives variados (RUPOLO, 2008).

As encostas da região oeste do Paraná apresentam declividade baixa para média apresentando em alguns setores o rebaixamento até o nível de base devido as redes hídricas da região. Para Tavares (2008) o clima propicia processos e graus diferenciados de alteração das rochas, originando coberturas pedológicas com características morfológicas, químicas, físicas e mineralógicas bem distintas.

No Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná, EMBRAPA-IAPAR (1972) distinguem-se aproximadamente 218 classes de solos para todo o território paranaense sendo que 76 ao nível de Grande Grupo e categorias inferiores estão localizadas no Terceiro Planalto Paranaense. A região Oeste do Paraná apresenta solos profundos, relevo alterando de suave ondulado a ondulado, com baixa acidez e sem impedimentos à mecanização no manejo agrícola, principalmente na área de ocorrência dos Latossolos (NAKASHIMA; NÓBREGA, 2003). De acordo com Nakashima e Nóbrega (2003) a diversidade dos solos depende principalmente dos fatores do meio físico.

Na área de estudo ocorre Latossolo Vermelho Férrico, não hidromórficos, o qual se caracteriza como solos minerais, profundos acentuadamente drenados, de coloração vermelho arroxeadada, partículas de minerais pesados. Esta propriedade foi observada com frequência na área, às partículas apresentavam elevada magnetização (Figura 12). Os Latossolos são altamente evoluídos, laterizados e ricos em argilominerais, a maior parte dos argilominerais encontrados na natureza é de estrutura lamelar, possuem divisão em grupos ou famílias: camadas 1:1; camadas 2:1; camadas 2:2 ou 2:2:1. A

nomenclatura 1:1 e 2:1 refere-se ao número de camadas de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e de octaedros de  $\text{Al}(\text{OH})_6$  (SANTOS, 1989).



Figura 12 – Concentração de partículas de minerais pesados transportadas depositadas às margens de estrada rural

A intensificação dos trabalhos no enfoque da cobertura superficial da encosta Bazzotti deu-se com objetivo de compreender as propriedades físicas do solo onde se desenvolvem os túneis na encosta. Foram efetuadas duas abordagens na caracterização superficial: a construção de perfil geológico na cabeceira da incisão e construção de transectos ao longo da encosta.

### **5.1. PERFIL GEOLÓGICO NA CABECEIRA DA INCISÃO**

Nesta perspectiva os levantamentos e suas descrições estão apresentados a seguir. A seção geológica foi construída na média encosta, na cabeceira da voçoroca que se formou a partir do colapso de parte do túnel. O perfil está representada na figura 13, ele tem 4 m de profundidade e 1 m de largura.





Figura 13 – Exposição do regolito, em destaque desembocadura do túnel, em 06/08/2011

A partir da exposição do perfil foram individualizadas 3 unidades de materiais (solo e alterita) totalizando 12 amostras, de acordo com as observações em campo, após análises de laboratório e interpretação dos dados, os resultados estão sintetizados no Quadro 2 e descritos na sequência:

Quadro 2 – Subdivisão das unidades

Classe textural	Unidades	Amostras	Prof. (m)	Grânulo %	Areia %	Silte %	Argila %	Cor	Mosqueamento	Densidade aparente	Densidade real	Porosidade Total	Características adicionais
ARENO-ARGILOSAS	1	S1A1	0 – 0,20	0,04	47,32	7,04	45,60	10R3/6	-	-	-	-	Acumulação de matéria orgânica.
		S1A2	0,20 – 0,50	0,24	49,42	8,74	41,60	2,5YR3/4	-	1,03	2,63	60,83%	Alta umidade; grumos de 5 mm; plasticidade alta.
		S1A3	0,50 – 0,78	0,18	51,62	10,20	38,00	2,5YR3/6	-	1,31	2,63	50,19%	Perda de umidade; argila; perda da plasticidade; presença de carvão; presenças de raízes.
		S1A4	0,78 – 1,00	0,52	51,86	10,42	37,20	2,5YR3/6	-	1,09	2,73	60,07%	Camada mais úmida que a anterior; pouquíssimos quartzos.
	2	S1A5	1,00 – 1,20	0,62	57,94	10,64	30,80	2,5YR3/6	-	1,14	2,70	57,77%	Concreções de ferro 1-2 mm; mantém umidade anterior;
		S1A6	1,20 – 1,63	0,24	56,52	10,44	32,80	2,5YR4/6	-	1,14	2,66	57,14%	Umidade média para alta; argilo – arenoso.
		S1A7	1,63 – 2,17	0,96	59,68	9,36	30,00	2,5YR4/6	-	1,14	2,66	57,14%	Umidade alta; plasticidade alta em relação a subjacente; cerosidade, estrutura granular.
		S1A8	2,17 – 2,65	0,16	54,06	10,58	35,20	5YR4/6	-	1,07	2,63	59,31%	Umidade média; plasticidade baixa; concreções; estrutura granular; arenoso com presença de ferro.
		S1A9	2,65 – 3,08	0,40	50,74	11,66	37,20	7,5YR5/8	10R3/6 - 50%	1,03	2,70	61,85%	Umidade baixa; plasticidade baixa; estrutura granular; concreções de ferro.
	3	S1A10	3,08 – 3,30	0,36	54,18	10,26	35,20	7,5YR5/8	10R3/6 - 15%	0,96	2,66	63,90%	Estrutura em grumos; concreções de ferro 0,5 mm; arenosa.
		S1A11	3,30 – 3,44	0,16	55,64	10,60	33,60	10YR6/8	10R3/6 - 50%	0,98	2,53	61,26%	Plasticidade baixa; umidade média.
		S1A12	3,44 – 3,61	0,06	53,62	10,72	35,60	7,5YR5/6	10R4/8 - 20%	0,96	2,59	62,93%	Plasticidade baixa; umidade alta; arenosa.

Do topo para a base do perfil tem-se:

Na unidade 1 contida entre o topo do perfil até 1 metro de profundidade, apresentou alvéolos com diâmetro de 3 a 5 cm parcialmente preenchidos. Nesta unidade evidenciou-se diversas cavidades circulares sem conexão entre elas, mas em estágio de avanço da erosão, devido aos desprendimentos de material da parede.

Destacam-se também nesta unidade macroporos centimétricos (4 a 12) e a presença de fragmentos de carvão em profundidade de 0,50 a 0,78 m, estes estavam dispersos nesta camada. A Porosidade total da unidade ficou entorno de 57,03%, a média da Densidade real entorna de 1,14, esta unidade apresentou estruturas de corte e preenchimento associados às ravinas, devido à drenagem da estrada rural convergir para o principal eixo da encosta.

A unidade 2 situa-se entre 1 m e 3,08 m de profundidade, pertence ao horizonte B latossólico, apresentou características de material desenvolvido com altos teores de argila e cerosidade. As unidades apresentam colorações tipicamente avermelhadas, dentro dos matizes 2,5YR e 10R e textura areno-argilosa. A transição entre as unidades era gradual, ocorrendo concentrações de pequenas concreções ferruginosas em locais distintos, entre 1,63 e 2,65 m de profundidade. A Densidade aparente manteve-se constante ao longo de sua unidade, a média da porosidade total não ultrapassou 57,84%, demonstrando maior coesão entre partículas.

Ao longo da unidade 3 ocorreu à diminuição da Densidade aparente com média de 0,98, e aumento da Porosidade total com 62,48%, nesta unidade foi evidenciada a camada de alterita diferenciado das demais pela concentração de mosqueamentos entorno de 20% nas cores de 10 R 3/6 e 10 R 4/8, o aumento do mosqueamento conferiu o caráter variegado ao material, nas cores 10 R 3/6 7,5 YR 5/8 e 7,5 YR 5/6. As três últimas amostras, apresentaram plasticidade baixa, fragmentos de rocha e concreções de ferro de 5 mm. Foi nesta unidade identificado o túnel.

A representação do perfil está contida na Figura 14, apresentando as características das unidades. A unidade 1 abrangeu a espessura de 1,20 m agrupando as

cinco primeiras amostras, a cor alternou entre 10R3/6 a 2,5YR3/6, ocorreu no seu topo acúmulo de matéria orgânica apresentando alta umidade, em nível intermediário entre 0,50 a 0,78 m apresentaram perda de umidade com início de pequenas concreções entre 1 e 2 mm. Nesta mesma unidade identificou-se presença de cavidades, raízes e carvão.

A transição da unidade 1 para a subjacente (2) foi identificada pela características da Porosidade Total passando de 60,07% para 57,77%, pelo incremento na umidade da amostra e a presença de concreções de ferro. Neste nível as amostras apresentaram plasticidade média a alta. As raízes superficiais estavam presentes nesta unidade.

A classificação textural de todas as amostras do perfil foi areno-argilosa. A distribuição granulométrica evidenciada na figura 14 mostra que as mais importante mudanças ocorreram nas profundidades correspondentes à amostra 3, com acréscimo da fração silte em torno de 21,8 % e uma diminuição da porcentagem de argila de 26,4%; na amostra 4 a argila retomou acréscimo em sua fração de 32,4 %, próximo a base do perfil, a amostra 9 apresentou acréscimo da fração argila com 34 %.

Ao longo do perfil os valores médios de Densidade Real ficaram em 2,40 e a Densidade Aparente em 1,07 a porosidade média total do perfil foi de 73,93 %.

No perfil a fração argila variou de 30 a 45,6%. A distribuição granulométrica evidenciou variações importantes que contribuíram para a definição das unidades principais de material de alteração presentes neste ponto da encosta. A densidade real e aparente acompanharam as variações da textura, pois, com a diminuição da argila em profundidade (média de 34,20%, Quadro 2, Unidade 3) os valores da densidade aparente diminuíram progressivamente, a média não ultrapassou os 0,96, consequentemente promoveu o aumento da porosidade total (média de 62,69%).

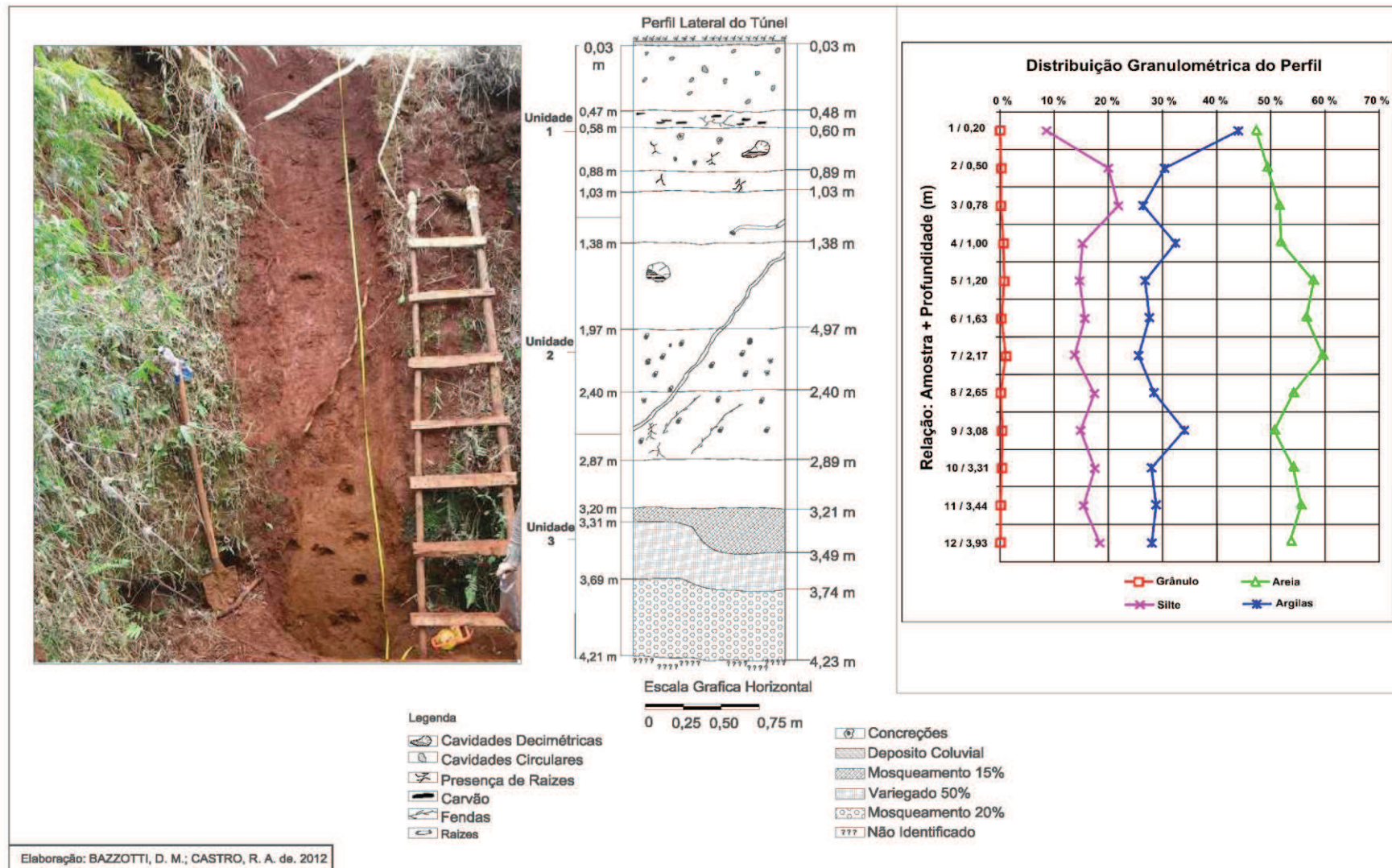


Figura 14 – Perfil de solo na lateral do túnel e suas características

## 5.2. TRANSECTOS LONGITUDINAL E TRANSVERSAL

Os transectos construídos a partir das sondagens mostraram as diferenças das unidades de cobertura superficial que cobre a encosta. A posição dos transectos e das sondagens está representado nas figuras 15 e 16.

### 5.2.1. Transecto 1

O transecto 1 foi efetuado longitudinalmente em relação ao eixo da encosta, que envolveu as tradagens T3, T5 e perfil, o mesmo possuía 60,27 metros de comprimento e variação de profundidade entre 3,95 m a 4,00 metros (Figura 15).

As tradagens T5 e T3 foram efetuadas em meio à pastagem no setor médio da encosta. As análises granulométricas mostraram pequena variação dos percentuais das frações na sondagem T5, isso, evidenciou-se nas porcentagens de argila em 43,20% (Quadro 3). Entre 1,20 m e 3,50 m de profundidade, foi identificado um duto subterrâneo, ocorreu um vazio no solo de 2,30 metros de altura, entretanto, esse túnel não apresentou fluxo ou concentração de água. A alta umidade do material gerando água livre foi encontrada somente a 4,00 metros. Na mesma sondagem foi identificado o cruzamento das frações argila e areia.

Quadro 3 – Resultado das análises granulométricas T5

Setor	Sondagem	Amostras	Prof. (m)	Grânulos (%)	Areias (%)	Silte (%)	Argilas (%)	Classe textural
Média Encosta	T5	Am1	0 – 1,04	0,96	47,30	8,54	43,20	Areno-Argilosas
		Am2	1,04 – 1,20	0,02	44,84	9,14	46,00	
		Am3	1,20 – 3,50	0,06	45,76	8,58	45,60	
		Am4	3,50 – 3,80	0,44	46,90	9,06	43,60	
		Am5	3,80 – 4,00	0,62	54,48	7,92	37,60	

No Quadro 4 são apresentados os resultados das análises granulométricas da sondagem T3, com 11 amostragens e profundidade máxima de 3,70 m. Observou-se a manutenção dos percentuais de argila entre 30,40% a 36,40%. Esta sondagem foi efetuada no eixo de drenagem principal da encosta, onde ocorre o alinhado do eixo com

o túnel. O piezômetro instalado nesta sondagem foi o que apresentou manutenção do nível freático por mais tempo na encosta. Nesta sondagem a variação mais importante ocorreu na diminuição das frações areia e argila e incremento da fração silte em 10,02%.

Quadro 4 – Resultado das análises granulométricas T3

Setor	Sondagem	Amostras	Prof. (m)	Grânulos (%)	Areias (%)	Silte (%)	Argilas (%)	Classe textural
Média Encosta	T3	Am1	0 – 0,45	0,52	54,20	8,88	36,40	Areno-Argilosas
		Am2	0,45 – 0,66	0,46	55,50	9,64	34,40	
		Am3	0,66 – 1,00	0,06	56,24	10,10	33,60	
		Am4	1,00 – 1,30	0,38	54,26	9,76	35,60	
		Am5	1,30 – 2,10	0,62	55,76	8,98	35,20	
		Am6	2,10 – 2,30	0,00	54,46	8,74	36,80	
		Am7	2,30 – 2,50	0,00	53,36	9,44	37,20	
		Am8	2,50 – 2,83	0,00	55,98	10,02	34,00	
		Am9	2,83 – 3,10	0,00	54,18	9,82	36,00	
		Am10	3,10 – 3,20	0,00	58,60	8,60	32,80	
		Am11	3,20 – 3,70	0,00	60,40	9,20	30,40	

As variações dos percentuais das frações granulométrica mostradas na figura 15, da sondagem T3 foram poucas expressivas, demonstrando uma relativa diminuição em profundidade da argila em consequência aumento da fração areia. O silte permaneceu uniforme em toda a sondagem.

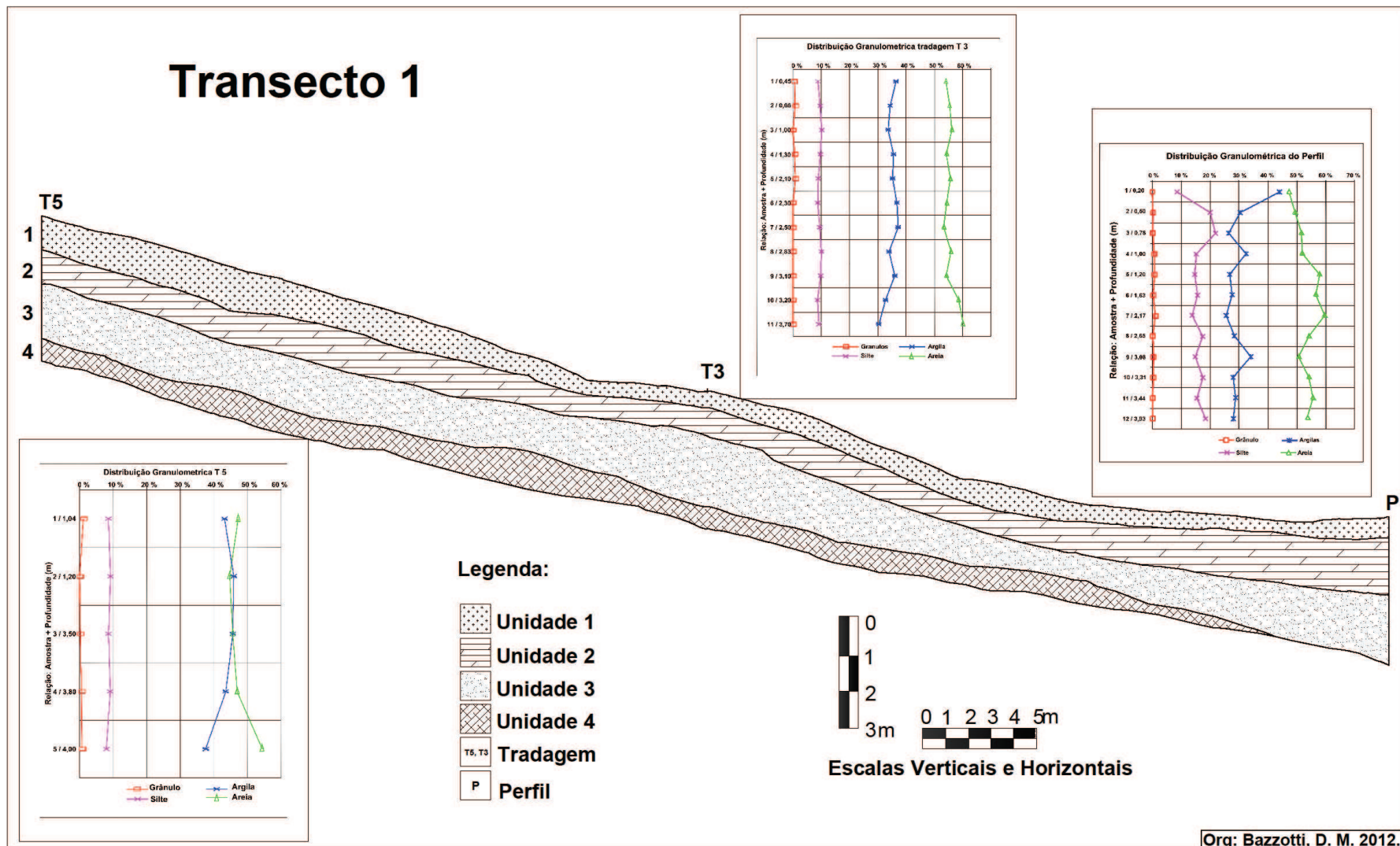


Figura 15 – Análise da transecto 1 e distribuição granulométrica



### 5.2.2 Transecto 2

O transecto 2 foi efetuado transversalmente na encosta abrangendo as tradagens T2, T4, T6, T7 e Perfil este transecto possui 89,40 metros de comprimento e variação de profundidade entre 4,70 m a 5,82 metros. A cobertura superficial que recobre o setor médio da encosta foi formada por cinco diferentes unidades, quatro das quais estão inseridas no transecto 1. A sondagem T2 atingiu 4,70 m de profundidade, sua distribuição granulométrica permaneceu relativamente homogênea em todo o seu conjunto. Grânulos ocorreram entre 0 m a 1,80 m, não ultrapassando 1% do total (Quadro 5).

Quadro 5 – Resultado das análises granulométricas T2.

Setor	Sondagem	Amostras	Prof. (m)	Grânulos (%)	Areias (%)	Silte (%)	Argilas (%)	Classe textural
Média Encosta	T2	Am1	0 – 0,20	0,42	56,84	10,74	32,00	Areno-Argilosas
		Am2	0,20 – 0,40	0,84	56,94	9,82	32,40	
		Am3	0,40 – 0,62	0,42	58,46	9,52	31,60	
		Am4	0,62 – 0,86	0,98	55,44	8,78	34,80	
		Am5	0,86 – 1,19	0,62	53,68	10,08	36,00	
		Am6	1,19 – 1,49	0,74	58,90	10,36	30,00	
		Am7	1,49 – 1,67	0,34	63,58	9,28	26,80	
		Am8	1,67 – 1,80	0,30	55,52	12,18	32,00	
		Am9	1,80 – 1,98	0,00	55,36	9,44	35,20	
		Am10	1,98 – 2,24	0,00	51,72	11,88	36,40	
		Am11	2,24 – 2,53	0,00	56,58	11,02	32,40	
		Am12	2,53 – 2,85	0,00	55,42	9,78	34,80	
		Am13	2,85 – 3,20	0,00	59,94	10,06	30,00	
		Am14	3,20 – 3,47	0,00	58,18	9,82	32,00	
		Am15	3,47 – 3,70	0,00	61,06	9,74	29,20	
		Am16	3,70 – 4,10	0,00	58,86	11,14	30,00	
		Am17	4,10 – 4,35	0,00	61,56	10,04	28,40	
		Am18	4,35 – 4,60	0,00	63,26	8,74	28,00	
		Am19	4,60 – 4,70	0,00	63,14	8,86	28,00	

As porcentagens de areia apresentaram aumento em profundidade, entre 1,67 m e 4,35 m. Os percentuais de argila não ultrapassaram os 36%.

O comportamento granulométrico da sondagem T2 (Figura 16) deixa clara a direta proporcionalidade da relação entre as frações, principalmente entre a argila e areia. Notou-se que o pico mais acentuado de variação ocorreu na amostra Am7, ocorreu diminuição significativa da argila apresentando 26,80%, no entanto, há resposta da fração areia apresentou 63,58% do total, com isso, remete-se aquilo que foi discutido anteriormente, a fração areia acompanha a oscilação da fração argila.

O transecto foi formado por cinco unidades da cobertura superficial, quatro das quais ocorreram no transecto 1. Na sondagem 4 em direção a baixa encosta, identificou-se a quinta unidade, caracterizando-se por material mais coeso formado por ruptura entre a unidade 4, esta não foi identificada no transecto 1, devido a profundidade não ultrapassar os 4 metros.

A sondagem T4 efetuada na média encosta, em meio a mata residual, demonstrou aumento dos percentuais de grânulos e areia em algumas das amostras dispersas na sondagem (Quadro 6), entre elas o que mais concentrou grânulos de 1 a 2 mm foi as amostras Am13 entre 3,20 - 3,50 metros e Am17 entre 4,20 - 4,42 metros, com os seus respectivos valores 2,04 % e 1,26%, isso ocorreu, pois, as amostras em sequência Am14 e Am18 tiveram aumento significativo de argila, gerando um nível de impedimento de percolação no regolito.

Quadro 6 –Resultado das análises granulométricas T4

Setor	Sondagem	Amostras	Prof. (m)	Grânulos (%)	Areias (%)	Silte (%)	Argilas (%)	Classe textural
Média Encosta	T4	Am1	0 – 0,20	0,06	51,58	8,76	39,60	Areno-Argilosas
		Am2	0,20 – 0,53	0,02	58,36	8,42	33,20	
		Am3	0,53 – 0,90	0,32	60,62	11,86	27,20	
		Am4	0,90 – 1,43	0,66	59,54	10,20	29,60	
		Am5	1,43 – 1,79	0,62	59,42	11,38	29,20	
		Am6	1,79 – 1,87	0,00	62,50	8,70	28,80	
		Am7	1,87 – 2,25	0,00	55,38	11,82	32,80	
		Am8	2,25 – 2,39	0,10	61,02	8,48	30,40	
		Am9	2,39 – 2,55	0,00	60,64	8,56	30,80	
		Am10	2,55 – 2,74	0,00	62,02	9,58	28,40	
		Am11	2,74 – 2,90	0,54	63,66	8,60	27,20	
		Am12	2,90 – 3,20	0,00	63,32	9,08	27,60	
		Am13	3,20 – 3,50	2,04	64,56	8,60	24,80	
		Am14	3,50 – 3,69	0,10	59,30	9,40	31,20	
		Am15	3,69 – 3,91	0,00	60,22	8,98	30,80	
		Am16	3,91 – 4,20	0,00	63,44	8,56	28,00	
		Am17	4,20 – 4,42	1,26	60,92	8,22	29,60	
		Am18	4,42 – 4,96	0,00	60,98	8,62	30,40	
		Am19	4,96 – 5,25	0,24	63,06	10,30	26,40	
		Am20	5,25 – 5,82	0,16	57,44	10,80	31,60	

Da mesma forma que a amostra T2 a sondagem T4 não apresentou a unidade 4, isso confirma que as unidades destas amostras estão condizentes com os resultados obtidos em laboratório pelas análises granulométricas, havendo neste setor da unidade 3 a maior infiltração vertical.



Na sondagem T6 a profundidade atingiu 3,76 metros. Essa sondagem foi efetuada próxima a uma ravina provocada pelo fluxo superficial da estrada rural, a mesma estava encaixada no eixo de drenagem secundário da encosta, apresentou diminuição de argila do topo para a base da sondagem (Quadro 7).

Quadro 7 - Resultado das análises granulométricas T6.

Setor	Sondagem	Amostras	Prof. (m)	Grânulos (%)	Areias (%)	Silte (%)	Argilas (%)	Classe textural
Média Encosta	T6	Am1	0 – 0,24	0,40	39,66	15,94	44,00	Areno-Argilosas
		Am2	0,24 – 0,36	0,60	47,92	10,28	41,20	
		Am3	0,36 – 0,48	0,46	52,78	9,96	36,80	
		Am4	0,48 – 0,60	0,54	57,34	10,12	32,00	
		Am5	0,60 – 1,12	0,62	55,16	8,56	35,20	
		Am6	1,12 – 1,22	0,70	53,86	12,64	32,80	
		Am7	1,22 – 1,50	1,26	58,28	11,26	29,20	
		Am8	1,50 – 1,88	0,92	57,88	8,80	32,40	
		Am9	1,88 – 1,97	0,72	62,46	4,82	32,00	
		Am10	1,97 – 2,26	0,26	63,00	9,94	26,80	
		Am11	2,26 – 2,55	0,36	61,18	11,26	27,20	
		Am12	2,55 – 2,79	0,30	59,84	13,86	26,00	
		Am13	2,79 – 2,90	0,04	58,82	10,74	30,40	
		Am14	2,90 – 3,05	0,02	56,80	11,98	31,20	
		Am15	3,05 – 3,28	0,00	61,22	7,98	30,80	
		Am16	3,28 – 3,38	0,00	58,86	8,34	32,80	
		Am17	3,38 – 3,76	0,58	61,34	9,68	28,40	

A variação granulométrica da sondagem T6, representada no transecto 2, demonstrou pequena variação de padrão entre as demais sondagens, pois, analisando a amostra Am8 e Am9 visualizou-se a diminuição na fração silte respectivamente 8,80% e 4,82% ao contrário da argila e areia que apresentaram elevação pouco expressiva. Ocorreu também pequeno aumento na fração dos grânulos nas amostras Am7, Am8 e Am9, não ultrapassando 1,26%.

Na sondagem T6 do transecto 2 foram identificadas cinco unidades de cobertura superficial. A unidade 4 foi a única que não apresentou a unidade contínua devido às

características do material. As análises granulométricas da sondagem T7 apresentaram contínua diminuição em profundidade das argilas (Quadro 8) não ultrapassando a profundidade máxima de 5,25 metros.

Quadro 8 – Resultado das análises granulométricas T7

Setor	Sondagem	Amostras	Prof. (m)	Grânulos (%)	Areias (%)	Silte (%)	Argilas (%)	Classe textural
<b>Média Encosta</b>	<b>T7</b>	Am1	0,00 – 0,38	0,40	48,98	11,82	38,80	<b>Areno-Argilosas</b>
		Am2	0,38 – 0,55	0,46	49,66	12,28	37,60	
		Am3	0,55 – 0,66	0,56	53,02	9,62	36,80	
		Am4	0,66 – 1,09	0,04	53,50	10,46	36,00	
		Am5	1,09 – 1,39	0,62	57,42	10,30	32,00	
		Am6	1,39 – 1,43	0,04	60,00	9,96	30,00	
		Am7	1,43 – 1,66	0,22	56,06	10,92	32,80	
		Am8	1,66 – 1,89	0,02	54,84	11,14	34,00	
		Am9	1,89 – 2,00	0,28	58,28	10,24	31,20	
		Am10	2,00 – 2,24	0,38	57,24	9,58	32,80	
		Am11	2,24 – 2,55	0,42	57,44	11,34	30,80	
		Am12	2,55 – 2,80	0,54	58,82	9,84	30,80	
		Am13	2,80 – 3,10	0,30	52,46	12,44	34,80	
		Am14	3,10 – 3,22	0,06	57,82	9,72	32,40	
		Am15	3,22 – 3,45	0,02	58,60	11,38	30,00	
		Am16	3,45 – 3,72	0,62	56,82	12,16	30,40	
		Am17	3,72 – 3,90	0,04	59,58	10,38	30,00	
		Am18	3,90 – 4,04	0,00	56,78	11,62	31,60	
		Am19	4,04 – 4,17	0,02	62,44	8,74	28,80	
		Am20	4,17 – 4,78	1,12	63,08	9,00	26,80	
		Am21	4,78 – 5,02	0,00	60,60	11,80	27,60	
		Am22	5,02 – 5,25	1,04	64,49	9,52	24,75	

No gráfico da Figura 16, referente à T7, observou-se diminuição constante da argila em profundidade em oposição ao aumento da fração areia. Destacou-se na amostra Am13 o aumento das frações silte 12,44% e argila 34,80%, e diminuição de areia para 52,46%, isso foi ocorreu também nas demais sondagens.

A unidade 4 deste transecto ocorreu lateralmente de forma descontínua, desaparecendo nos furos T4 e T2. As características principais foram semelhantes à unidade 3 do transecto 1, onde englobou os furos T5 e T3, esta unidade apresentou porosidade maior facilitando a saturação da unidade, conseqüentemente mais friável, portanto, sugerindo que isso se deva às condições topográficas da encosta, que neste setor apresentou maior umidade, e maior complexidade em perfil dos materiais.

### 5.3. CONCLUSÕES PARCIAIS

As variações texturais em perfil na encosta Bazzotti indicaram uma variação das argilas em profundidade entre 30 a 45,6% em média. A presença de concreções de ferro conferiu aos materiais textura areno-argilosa. As concreções ferruginosas foram formadas a partir de dissoluções de minerais primários, agrupando-se em pequenos grânulos, provocando impacto na textura do solo, pois, comportaram-se de forma a incrementar a porcentagem da fração areia, promovendo textura mais friável destoando das porcentagens normais para solos argilosos.

As mudanças nos valores de densidade real e aparente acompanharam a variação textural, pois, com a diminuição da argila em profundidade média de 34,20%, os valores da densidade aparente (média de 0,96) e real (média de 2,59) diminuíram progressivamente, conseqüentemente promoveram o aumento da porosidade total (média de 62,69%).

A cobertura superficial é constituída por cinco diferentes unidades com características físicas muito semelhantes entre si. Quatro dessas unidades ocorreram nos dois transectos. As diferenças identificadas foram a partir das classes texturais da plasticidade dos mosqueamentos, presença de concreções e coloração das amostras.

Ao longo do perfil exposto na cabeceira da voçoroca foi observadas fraturas atravessando as 3 unidades basais, macroporos alongados de 5 a 10 cm de diâmetro e uniformidade de materiais, sendo difícil a individualização das unidades, mesmo com essas características. Assim entende-se que a cobertura superficial é constituída por material eluvial que mantém ainda as características estruturais da rocha.

No topo do perfil a ocorrência de heterogeneidade de materiais, seixos soterrados e carvão indicando presença de material coluvial.

O túnel ocorre na unidade 3, entre 3,20 a 4 metros de profundidade, apresentando baixa plasticidade e maiores percentuais de areia. Entende-se que estas características favoreceram a instalação da erosão (Figura 17). O diâmetro do túnel é de 0,85m, e no local de onde foi retirada a amostra Am9 é a zona mais impermeável e consolidada pela presença maior de argila. As amostras Am10, Am11 e Am12, ocorreu diminuição da argila com incremento da silte e elevação da areia, isso tornou a camada do regolito friável de fácil desagregação, como o local é zona de exfiltração essa camada estava sempre úmida, possibilitando desprendimentos de placas no interior do túnel ou mesmo pequenos movimentos de massa, promovendo retenção de material no túnel.



Figura 17 – Entrada do túnel parcialmente entulhada. Em destaque zona de exfiltração (olho d'água), em 18/03/2008



## CAPÍTULO VI

### 6. PIEZOMETRIA DA ENCOSTA

O monitoramento dos piezômetros foi efetuado no período de Outubro de 2011 a Setembro de 2012 totalizando 12 meses. Foram instalados 5 piezômetros nomeados como P2, P3, P5, P6, P7 abrangendo os dois eixos da encosta, as leituras foram efetuadas diariamente às 8h30min e os valores anotados em formulário próprio.

Segundo Agência Nacional de Águas (2002) em aquíferos freáticos o nível da água varia segundo a quantidade de chuva, nas épocas com mais chuva o nível freático sobe e em épocas em que chove pouco o nível freático desce.

A percolação da água no subsolo ocorre devido à camada superior do solo não estar saturada, promovendo assim a recarga do lençol freático, que não se dá de forma contínua, pois depende dos eventos de chuva mais significativos (quantidade, duração e intensidade) com isso, ocorre o aumento do volume de água estocada, elevando o nível do lençol freático, essa elevação do lençol implicando em aumento de gradiente, aumentando assim a velocidade do fluxo para a jusante.

Tratando-se da velocidade do fluxo d' água subterrâneo é notório a lentidão em comparação com a velocidade dos fluxos superficiais. Segundo Cleary (1989) o fluxo subterrâneo rápido é da ordem de 1 m/dia, enquanto, num rio de alta velocidade o valor fica em torno de 1 m/s. Já em comparação com o tempo médio de permanência da água superficial é de algumas semanas enquanto o da água subterrânea é estimado em 280 anos, em média. Esse longo período de residência da água subterrânea faz do aquífero um ambiente extremamente sensível à contaminação, que se ocorrer, pode levar séculos até que se processe a descontaminação por mecanismos de fluxo natural (CLEARY, 1989).

No momento que o lençol d'água interceptar a superfície, a água drenará para fora do sistema subterrâneo (processo de exfiltração), numa certa descarga, em direção aos pântanos, lagos, canais, etc. (DUNNE, 1990). Na encosta Bazzotti, esta zona de exfiltração está conectada ao túnel, promovendo o alívio de carga do sistema.

## 6.1. O COMPORTAMENTO DA OSCILAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO

### 6.1.1. Análise da piezometria

Na sequência foram analisados os dados referentes à piezometria da área de estudo. Foi avaliada a resposta dos piezômetros à precipitação registrada na área em termos de carga total. A partir desses dados foi possível identificar diferentes tipos de gradientes entre os pontos que corresponderam aos piezômetros, que por sua vez auxiliaram na definição das rotas de fluxos de água em subsuperfície.

Em função da distribuição da precipitação entre outubro de 2011 e setembro de 2012, foram individualizados três períodos para análise:

- a) Quadrimestre 1 – 1/10/2011 a 31/01/2012
- b) Quadrimestre 2 – 1/02/2012 a 31/05/2012
- c) Quadrimestre 3 – 1/06/2012 a 30/09/2012

Nestes três períodos de análise foram extraídos os dias com cargas piezométricas totais máximas e mínimas, cujos dias estão listados no quadro 9.

Quadro 9 – Períodos de análise de cargas totais e dias correspondentes aos valores de cargas máximas e mínimas

<b>Quadrimestre</b>	<b>Dias com cargas máximas</b>	<b>Dias com cargas mínimas</b>
1°	15/11/2011	13/01/2012
2°	30/05/2012	5/04/2012
3°	08/07/2012	17/08/2012

Em função da ampla variação pluviométrica nos meses monitorados, o lençol apresentou importantes variações no mesmo período. Os piezômetros P5, P6 e P7 apresentaram água apenas nos períodos de recarga. Em períodos de descarga ou de rebaixamento geral do nível piezométrico na encosta, o P3 manteve-se com carga piezométrica estável por período mais longo.

O piezômetro P2 foi incluído nos resultados, mas não apresentou resultados na recarga ou descarga da pressão piezométrica no período analisado, mesmo nos períodos de resposta hidrológicas maiores.

As abordagens efetuadas a seguir respeitarão esses períodos e dias citados anteriormente.

## **6.2. VARIACÃO DE CARGA TOTAL E ALTURA DE ÁGUA**

A carga total é a soma da altura da ponteira do piezômetro em relação a um *datum* e a carga de pressão. A carga de pressão representa a altura da água no piezômetro.

A análise foi efetuada considerando os três períodos correspondentes ao quadrimestre do período avaliado, para cada um deles foram analisadas as respostas dos piezômetros à precipitação, bem como as cargas totais.

### **6.2.1. Primeiro quadrimestre**

No primeiro quadrimestre o comportamento dos níveis freáticos apresentaram respostas imediatas aos índices pluviométricos (Figura 8). A precipitação total neste período foi de 743,6 mm. Os maiores volumes diários (precipitados em 24 horas) foram de 78,2mm e 73,6mm (25 e 29 de outubro de 2011); 58,2mm e 50,6mm (13 e 21 de novembro de 2011) e 57,2 mm e 135 mm (12 e 13 de janeiro de 2012).

Os piezômetros P5 e P6 foram os que apresentaram resposta mais rápida às precipitações, da mesma forma que apresentaram rebaixamento rápido em períodos de vazão.

O piezômetro P3 manteve a carga de pressão piezométrica constante em todo o período, ocorreu oscilações de baixa magnitude. Assume-se que até 14/12/2011 ocorreu a recarga do lençol, após esse período a uma inflexão do nível passando a ocorrer à descarga da vazão. Neste piezômetro a resposta à precipitação apresentou retardo de 25 dias em relação aos outros piezômetros de resposta imediata às variações de precipitação.

O piezômetro P7 apresentou resposta imediata à precipitação nos três primeiros meses.

Com base nos valores de precipitação registrados e considerando a relação inversa entre intensidade de precipitação e volume de água que infiltra no solo, poder-se-ia concluir que as cargas piezométricas estariam baixas, contudo não foi isso que os piezômetros indicaram. As recargas mantiveram os valores elevados de altura, principalmente em novembro e dezembro. Dessa forma, entende-se que para manter esses valores de carga totais mais elevados os materiais da encosta já deveriam apresentar uma umidade antecedente que possibilitou descarga mais lenta se comparada como os demais quadrimestres.

Após a progressiva vazão no dia 04 de dezembro de 2011 a 3 de janeiro de 2012 com rebaixamento rápido dos piezômetros P5, P6 e P7 inicia-se o período de manutenção da carga piezométrica, neste período a precipitação foi de 86,6 mm.

Tem-se assim, a manutenção do lençol entre os períodos de 03 a 31 de janeiro de 2012, quando apenas o P3 apresentou coluna de água.

No período de 12 a 13 de janeiro de 2012 a precipitação acumulada foi 193,2 mm, chuva essa que não influenciou a variação da carga de pressão nos piezômetros, devido à intensidade da pluviosidade não permitindo a infiltração no lençol.

Na figura 18 ficou evidente a redução de carga piezométrica entre 4 de dezembro e 3 de janeiro. A partir desta data, o nível piezométrico geral na encosta foi zerado, a exceção do P3 que apresentou redução paulatina da altura da carga piezométrica.

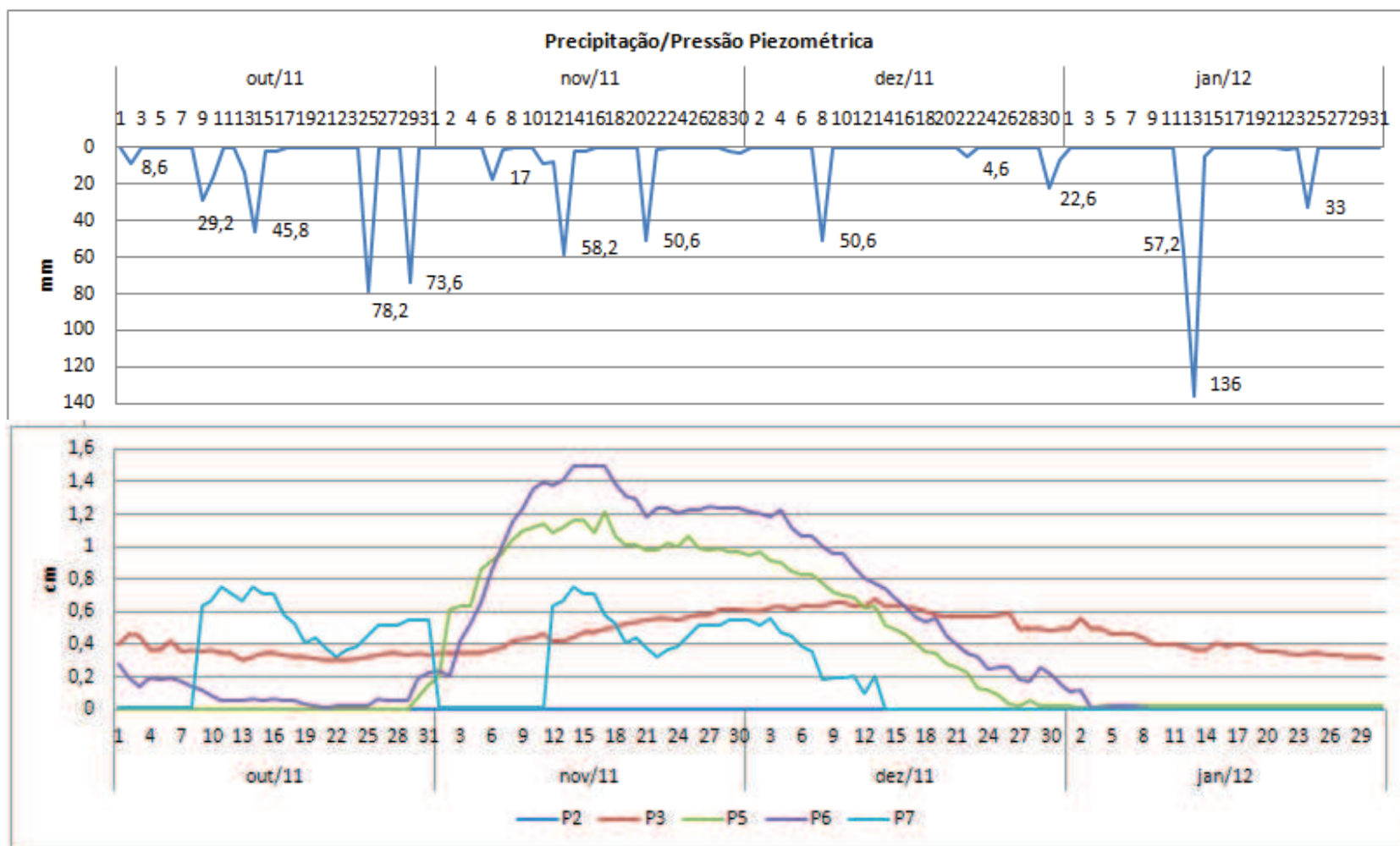


Figura 18 – Gráfico apresentando as variações de cargas de pressão e a distribuição da precipitação no primeiro quadrimestre.

### 6.2.2. Segundo quadrimestre

O segundo quadrimestre foi marcado por importante descarga da encosta quando os piezômetros registraram as menores alturas de carga piezométrica ou cargas nulas no decorrer dos 12 meses (Figura 19).

Dentre os piezômetros, o P3 foi o único ativo até 26/02/2012, ao manter uma curva descendente de rebaixamento dos níveis piezométricos. Este piezômetro manifestou resposta à precipitação de 114 mm em fevereiro (19 a 29 de fevereiro de 2012), entretanto a maior elevação da carga piezométrica que corresponde à resposta do piezômetro à precipitação, só foi ocorrer em 29 de fevereiro, ou seja, com retardo ou atraso de 8 dias.

O rebaixamento total dos piezômetros deu-se entre de 27 de março e 03 de maio, não havendo oscilação nos piezômetros.

No período de 06 de março a 23 de maio de 2012 a pluviometria indicou maiores volumes de precipitação em 24h. Neste período choveu 332,6 mm, estas chuvas ocorreram de forma concentrada em período curto de tempo sobre a área de estudo.

O mês mais chuvoso foi abril entre os dias 05 a 29 de abril, cujos valores de precipitação acumulada são de 290,6 mm. No quadrimestre o volume total de chuvas foi de 538,6 mm.

No mês de maio as chuvas tiveram intensidade menor, o acumulado foi de 99,5 mm, neste mês ocorreram picos de recarga concentrados somente nos piezômetros P6 e P3, mas com rápida resposta de descarga.

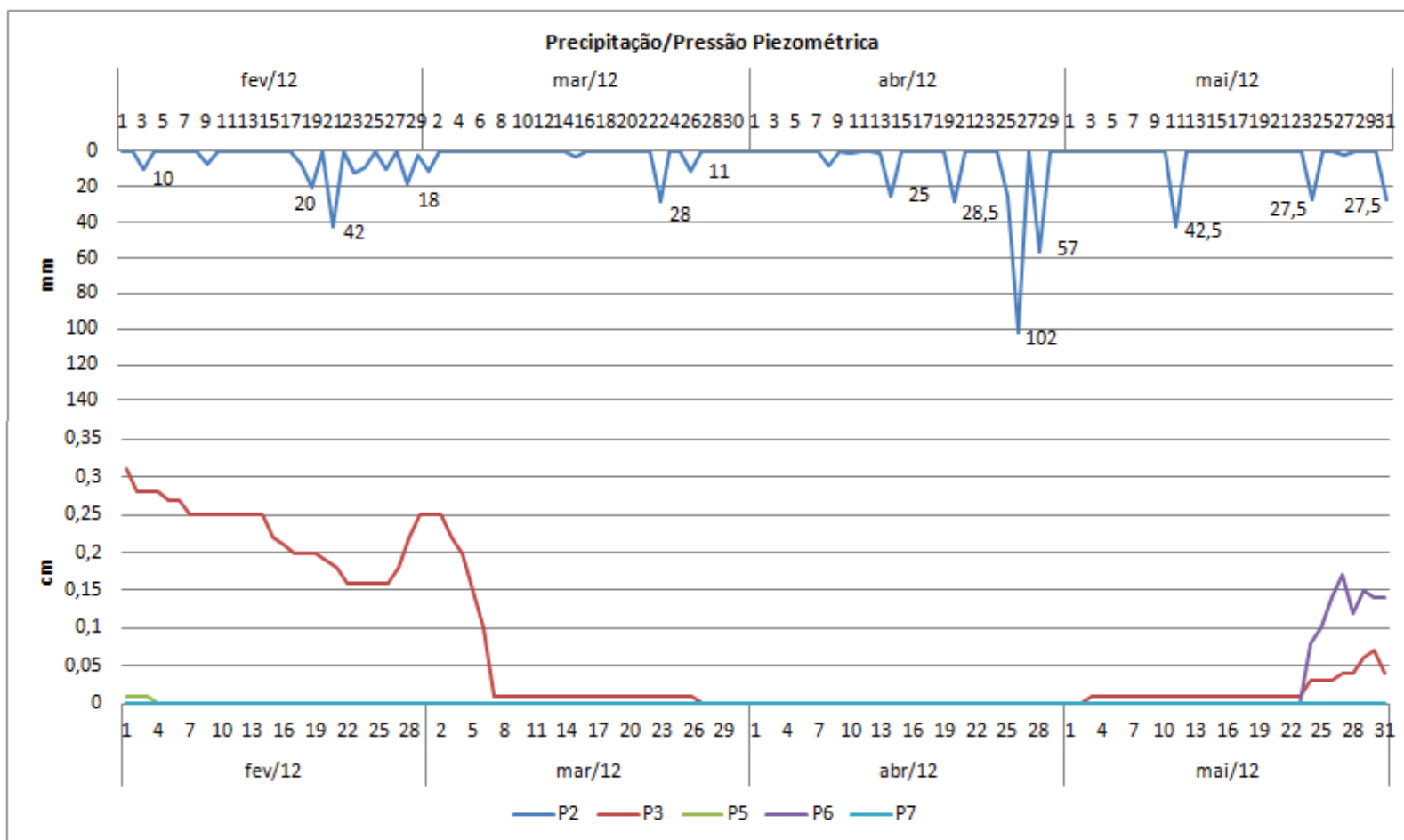


Figura 19 – Gráfico apresentando as variações de cargas de pressão e a distribuição da precipitação no segundo quadrimestre

### 6.2.3. Terceiro quadrimestre

O terceiro quadrimestre apresentou baixa pluviosidade com 357,5 mm no decorrer dos 12 meses de pesquisa (Figura 20).

Os piezômetros que apresentaram recarga relativamente rápida foram P6 e P5 respectivamente, no dia 18 de junho de 2012 o piezômetro P6 registrou acréscimo de carga piezométrica devido ao acúmulo de precipitação neste dia chegar a 114 mm, já o P5 registrou o início da recarga no dia 29 do mesmo mês apresentando comportamento aleatório no período de vazão.

O P6 no período de 18 de junho a 10 de agosto de 2012 comportou-se de forma extremamente rápida no que se refere à recarga e vazão, não havendo estabilização da pressão piezométrica. Durante este período apresentou pulsos de recarga e descarga, não mantendo os níveis piezométricos durante os três meses.

Da mesma forma que o piezômetro P6 o P5 recebeu recarga no dia 27/06/2012 e estabilizou no dia 24/08/2012 devido à rápida descarga da vazão.

Ao contrário do P5 e P6 o piezômetro P3 promoveu respostas mais lentas em sua recarga, mas conseguiu no período de baixa pluviosidade manter seu nível piezométrico. A recarga acontece gradativamente a partir de 01/06/2012 até o dia 17/07/2012, a partir desta data a pressão piezométrica estabilizou-se até 08/08/2012 ocorrendo picos positivos e negativos da pressão, após esta data ocorreu o declínio da pressão (descarga da vazão).



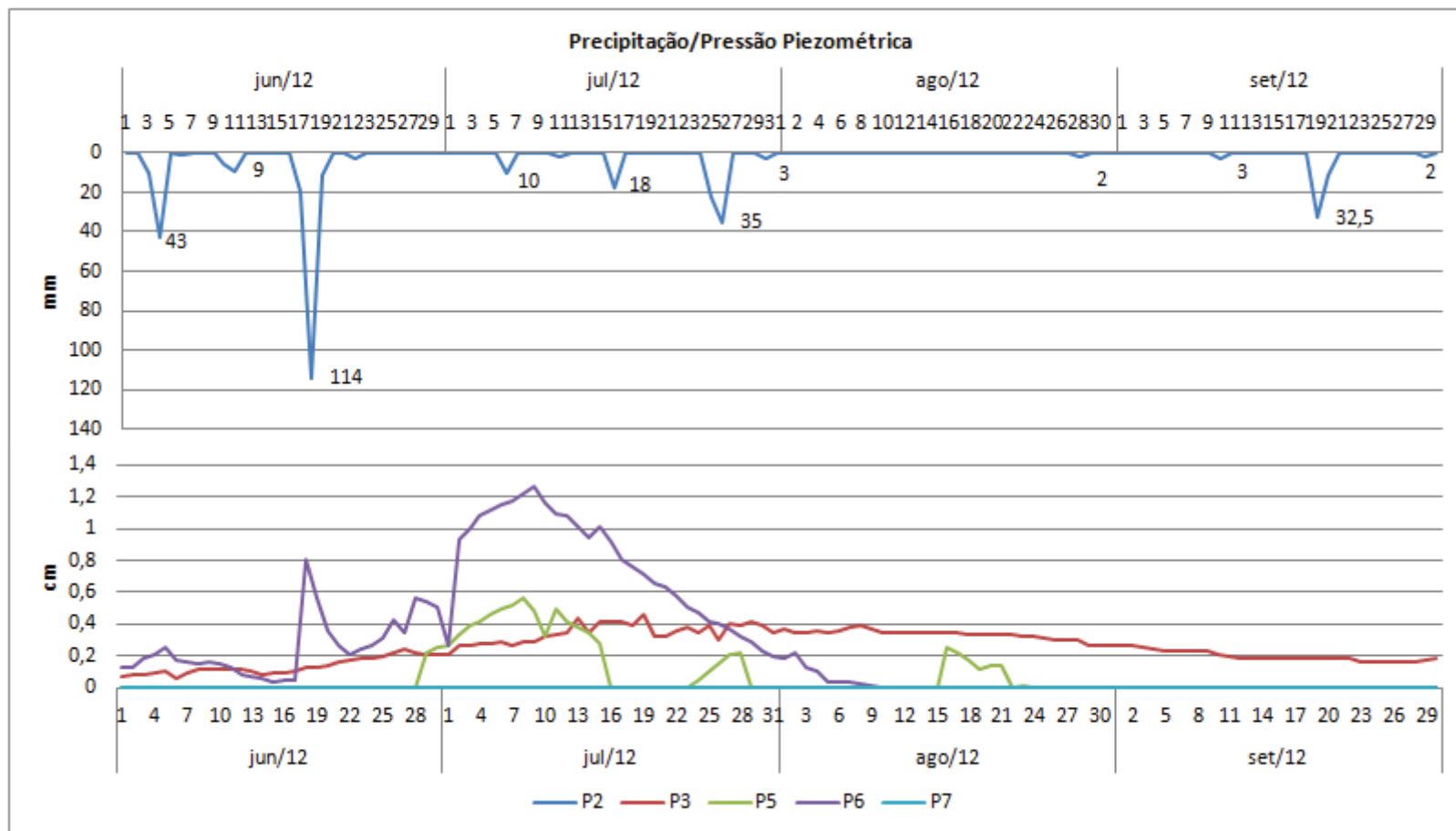


Figura 20 – Gráfico apresentando as variações de cargas de pressão e a distribuição da precipitação no terceiro quadrimestre

### 6.3. CÁLCULOS DE GRADIENTES E CONSIDERAÇÕES DINÂMICAS

A partir dos períodos analisados (Quadrimestre 1, 2 e 3) e das cargas totais e piezométricas máximas e mínimas foi estimado o gradiente hidráulico.

O gradiente hidráulico foi calculado após estimar as direções entre os piezômetros e suas respectivas distâncias:

a)  $P6 - P5 = 75,22$  m

b)  $P7 - P5 = 87,85$  m

c)  $P7 - P6 = 25,11$  m

d)  $P6 - P3 = 66,71$  m

e)  $P7 - P3 = 85,89$  m

f)  $P5 - P3 = 27,79$  m

A seguir são discutidos os resultados a respeito da referida abordagem:

#### 6.3.1. Gradiente hidráulico

Os gradientes hidráulicos representam a variação de carga entre pressões (h) ao longo de uma distância macroscópica.

O Quadro 10 mostra os gradientes hidráulicos entre os pontos selecionados para as condições máxima e mínima de cargas de pressão dos 3 quadrimestres analisados.

Quadro 10 – Gradientes hidráulicos entre os pontos selecionados de cada dia de carga piezométrica máxima e mínima dos três quadrimestres. Os gradientes não têm dimensão, mas expressam, neste caso a variação de carga total (em centímetros) ao longo de distâncias horizontais.(em centímetros).

Rota	Quadrimestre 1		Quadrimestre 2		Quadrimestre 3		Valores Médios
	Máxima 15/11/2011	Mínima 13/01/2012	Máxima 30/05/2012	Mínima 05/04/2012	Máxima 08/07/2012	Mínima 17/08/2012	
P6 - P5	0,045	0,040	0,043	0,041	0,049	0,038	0,043
P7 - P5	0,076	0,081	0,081	0,081	0,011	0,011	0,057
P7 - P6	0,131	0,162	0,118	0,123	0,075	0,123	0,147
P6 - P3	0,152	0,132	0,138	0,137	0,151	0,132	0,140
P7 - P3	0,145	0,138	0,142	0,143	0,139	0,139	0,152
P5 - P3	0,244	0,207	0,221	0,219	0,229	0,215	0,222

Os maiores gradientes observados estão na rota P5 - P3, por conseguinte, indicando o maior fluxo entre os dois piezômetros. Os períodos que apresentaram a maior gradiente de umidade foram respectivamente na ordem decrescente P7 - P3; P6 - P3 e P5 - P3, mostrando que o fluxo que alimenta o lençol converge para o eixo principal da encosta onde está o piezômetro P3.

O menor gradiente hidráulico no período seco foi identificado no P6 - P5 com 0,038 cm/cm ou 0,38 mm/m ou 3,8 cm/m.

O valor médio dos pontos selecionados entre a máxima e a mínima da pressão hidráulica nos três quadrimestres ficou em 0,127 cm/cm ou 1,27 mm/m ou 12,7 cm/m.

O maior gradiente hidráulico registrado foi ao longo da rota entre P5 - P3 com 0,244 cm/cm ou 2,44 mm/cm ou 24,4 cm/m com fluxo entre os piezômetros, em contrapartida o menor gradiente ocorreu no P6 - P5 com 0,038 cm/cm, ou 0,38 mm/cm, ou 3,8 cm/m. A média geral dos gradientes hidráulicos é de 0,123 cm/cm, ou 1,23 mm/cm, ou 12,3 cm/m.

#### 6.4. CONCLUSÕES PARCIAIS

No primeiro quadrimestre o comportamento dos níveis freáticos apresentaram respostas imediatas aos índices pluviométricos. Os piezômetros P5 e P6 foram os que mais apresentaram resposta rápida às precipitações, da mesma forma que apresentaram rebaixamento rápido em períodos de vazão.

O piezômetro P3 manteve a carga de pressão piezométrica constante em todo o período, ocorrendo oscilações de pequena magnitude. Neste piezômetro a resposta à precipitação apresentou retardo de 25 dias em relação aos outros piezômetros de resposta imediata às variações de precipitação.

O segundo quadrimestre foi marcado por importante descarga da encosta quando os piezômetros registraram as menores alturas de carga piezométrica ou cargas nulas no decorrer dos 12 meses.

Dentre os piezômetros, o P3 foi o único ativo até 26/02/2012, ao manter uma curva descendente de rebaixamento dos níveis piezométricos.

O mês mais chuvoso foi abril entre os dias 05 a 29 de abril, cujos valores de precipitação acumulada são de 290,6 mm. No mês de maio as chuvas tiveram intensidade menor, o acumulado foi de 99,5 mm, neste mês ocorrem picos de recarga concentrados somente nos piezômetros P6 e P3, mas com rápida resposta de descarga. O terceiro quadrimestre apresentou baixa pluviosidade com 357,5 mm.

O P6 apresentou respostas rápidas no que se refere à recarga e vazão, não havendo estabilização da pressão piezométrica, apresentou pulsos de recarga e descarga, não mantendo os níveis piezométricos durante os três meses.

O maior gradiente hidráulico registrado foi ao longo da rota entre P5 - P3 com de 0,244 cm/cm ou 2,44 mm/cm ou 24,4 cm/m com fluxo entre os piezômetros.

O menor gradiente ocorreu no P6 - P5 com 0,038 cm/cm, ou 0,38 mm/cm, ou 3,8 cm/m.

## 7. CONCLUSÕES

A encosta Bazzotti, apresenta declividade de 12% na área destinada à lavoura com 244,43 metros de extensão, no setor mais baixo apresenta 16% de declividade abrangendo as áreas destinadas ao reflorestamento, a mata residual, a pastagem e o túnel, totalizando 93,88 metros de extensão, a cota altimétrica e de 827 metros (topo) e com 775 metros a jusante (local da incisão da erosão).

Os principais mecanismos de erosão reconhecidos foram o desprendimento de material das paredes da voçoroca, que assume proporções maiores em períodos de chuva. O fluxo concentrado e os movimentos de massa ocorridos no interior da voçoroca foram caracterizados por movimentos translacionais. Os alvéolos contribuíram para ampliar as dimensões do túnel, pois, interiormente o teto do túnel apresentou cavidades que se ampliam por ação da água que exfiltra.

O desprendimento de placas é um mecanismo importante na evolução deste túnel, tornando-se o fator que mais contribui para a ampliação da estrutura. Os sedimentos deprendidos do túnel promoveram consecutivos represamentos do fluxo interno, conseqüentemente a saturação da base, o qual gerou-se pequenos movimentos de massa internamente devido a sustentação estar comprometida.

Em perfil a encosta Bazzotti apresentou variação das argilas em profundidade entre 30 a 45,6% em média. A presença de concreções de ferro conferiu aos materiais textura areno-argilosa. As concreções ferruginosas incrementaram a porcentagem da fração areia, promovendo textura mais friável destoando das porcentagens normais para solos argilosos.

Com a formação de concreções ferruginosas devido à lixiviação e o aumento da porosidade total na base do perfil (unidade 3), a ampliação do túnel foi facilitada devido à convergência dos fluxos subterrâneos para este local.

As mudanças nos valores de densidade real e aparente acompanharam a variação textural, pois, com a diminuição da argila em profundidade os valores da densidade aparente e real diminuíram progressivamente, conseqüentemente promoveu o aumento da porosidade total.

A cobertura superficial é constituída por cinco diferentes unidades de materiais com características físicas muito semelhantes entre si. Quatro dessas unidades ocorrem nos dois transectos. As diferenças identificadas foram a partir das classes texturais, da plasticidade, dos mosqueamentos, presença de concreções e coloração das amostras.

Ao longo do perfil exposto na cabeceira da voçoroca foram identificadas fraturas atravessando as três unidades basais, apresentando macroporos alongados de 5 a 10 cm de diâmetro com uniformidade de materiais. Assim entende-se que a cobertura superficial é constituída por material eluvial que mantém ainda as características estruturais da rocha.

No topo do perfil, os materiais apresentaram heterogeneidade, seixos soterrados e carvão indicaram presença de material coluvial. O túnel ocorre na unidade 3 entre 3,20 a 4 metros de profundidade, apresentou baixa plasticidade e maiores percentuais de areia. Entende-se que estas características favoreceram a instalação da erosão.

A ampliação do túnel ocorreu lateralmente e horizontalmente na cobertura superficial, a embocadura possui diâmetro de 0,85 centímetros, a amostra Am9 do perfil da encosta foi zona mais impermeável e consolidada pela presença maior de argila, as demais Am10, Am11 e Am12 ocorreu uma diminuição da argila com incremento da silte e elevação da areia, isso tornou a camada do regolito mais friável de fácil desagregação, como o local é zona de exfiltração essa camada estava sempre úmida, possibilitando desprendimentos de placas no interior do túnel ou mesmo pequenos movimentos de massa, promovendo retenção de material no túnel.

No primeiro quadrimestre de monitoramento dos piezômetros o comportamento dos níveis freáticos apresentaram respostas imediatas aos índices pluviométricos. Os piezômetros P5 e P6 foram os que apresentaram resposta mais rápida às precipitações, da mesma forma que apresentaram rebaixamento rápido em períodos de vazão. O piezômetro P3 manteve a carga de pressão piezométrica constante em todo o período, ocorrendo oscilações de pequena magnitude. Neste piezômetro a resposta à precipitação apresentou retardo de 25 dias em relação aos outros piezômetros de resposta imediata às variações de precipitação.

O segundo quadrimestre é marcado por importante descarga da encosta quando os piezômetros registraram as menores alturas de carga piezométrica ou cargas nulas no decorrer dos 12 meses. Dentre os piezômetros, o P3 foi o único ativo até 26/02/2012, ao manter uma curva descendente de rebaixamento dos níveis piezométricos. O mês mais chuvoso foi abril entre os dias 05 a 29 de abril, cujos valores de precipitação acumulada são de 290,6 mm. No mês de maio as chuvas tiveram intensidade menor, o acumulado foi de 99,5 mm, neste mês ocorreram picos de recarga concentrados somente nos piezômetros P6 e P3, mas com rápida resposta de descarga.

O terceiro quadrimestre apresentou baixa pluviosidade com 357,5 mm. O P6 apresentou respostas rápidas no que se refere à recarga e vazão, não havendo estabilização da pressão piezométrica, apresentou pulsos de recarga e descarga, não mantendo os níveis piezométricos durante os três meses. O maior gradiente hidráulico registrado foi ao longo da rota entre os piezômetros P5 - P3 com de 0,244 cm/cm ou 2,44 mm/cm ou 24,4 cm/m com fluxo entre eles. A menor gradiente ocorreu no P6 - P5 com 0,038 cm/cm, ou 0,38 mm/cm, ou 3,8 cm/m.

O agravamento da incisão da voçoroca deu-se também pela erosão superficial concentrado que ocorre em decorrência do escoamento das águas pluviais da estrada, o qual drena seu volume para baixa encosta, provocando a ampliação devido o fluxo concentrado gerar alcovas de regressão na parte superior da incisão. A falta de contenção dos fluxos superficiais da estrada promoveu o agravamento e a deterioração da estrada, elevando-se os custos de manutenção e potencializando a degradação da nascente.

A adequação da estrada rural na encosta Bazzotti é uma das medidas mitigadoras complementares e indispensáveis para o manejo da erosão e preservação do manancial.

Apesar de outros fatores contribuírem significativamente na ampliação da voçoroca, o túnel é ainda um dos principais processos de erosão na cabeceira da mesma, o qual promove desprendimento do material de sua base, gerando deslizamentos de proporções maiores de material.

Um importante fator para a evolução deste túnel e a contribuição da drenagem da encosta, onde o fluxo subsuperficial converge para o eixo da encosta, o alinhamento

entre os piezômetros P5 e P3 identifica o eixo principal. A manutenção do nível freático do piezômetro P3 demonstrou que em épocas de escassez hídrica o nível de reserva da encosta está garantido, possibilitando a descarga lenta da drenagem.

Os fatores texturais permitem a ampliação do túnel, a unidade 3 do perfil foi a que favorece a maior circulação de água na encosta, logo, o túnel desenvolve-se e amplia-se, pois, ha ocorrência maior do percentual de areia, implicando no aumento da porosidade, conseqüentemente os valores são menores da Densidade Real e Aparente na unidade, a migração dos fluxos subsuperficiais tende para esses locais mais porosos, justificando a instalação do túnel nesta área do perfil. As unidades superiores permitiram a manutenção dos níveis freáticos, são as mantenedoras dos níveis piezométricos da encosta, apresentaram características maiores na textura e na plasticidade, dificultando a percolação no material. A camada subjacente da unidade 3 mostrou-se mais consolidada, dificultando a incisão do fluxo verticalmente.

O desenvolvimento do túnel está intrinsecamente relacionado aos fatores hidrológicos, topográficos e texturais da encosta Bazzotti, os quais propiciam a instalação e evolução dos mecanismos de erosão subsuperficial.

Portanto, os fatores que contribuem para a instalação e evolução do túnel na encosta Bazzotti, expressam a dinâmica direta na evolução da voçoroca, a qual molda o relevo ao longo dos anos.



## 8. REFERÊNCIAS

ANA (2002). Agência Nacional de Águas. **Águas Subterrâneas**. Superintendência de Informações Hidrológicas – SIH. Brasília, DF. 85 p.

ANA (2005). Agência Nacional de Águas. **Disponibilidade e Demanda de Recursos Hídricos no Brasil**. Cadernos de Recursos Hídricos. Brasília, 215 p.

ATLAS GEOMORFOLÓGICO DO ESTADO DO PARANÁ. **Escala Base, 1:250.000/1:500.00 modelos reduzidos minerais do Paraná**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006. 63 p.

BACCARO, C. A. D. **As unidades geomorfológicas e a erosão nos chapadões do município de Uberlândia**. Revista Sociedade e Natureza, Uberlândia, n. 6, v. 11 e 12, jan-dez, 1994. p. 19-33.

BACELLAR, L. A. P. **Processos de Formação de Voçorocas e Medidas Preventivas e Corretivas**. Viçosa, 2006. 30 slides.

BIGARELLA, J. J.; MAZUCHOWSKI, J. Z. **Visão Integrada da Problemática da Erosão**. Curitiba, Associação de Defesa e Educação Ambiental da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia; 1985. 329 p.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais: Aspectos Erosivos e Denudacionais**. Florianópolis: EDUFSC, 1996.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4. ed. São Paulo: Ícone, 1999. 355 p.

BORDIGNON; C. V. M.; **Avaliação das Condições Sócio-Ambientais e Importância do Parque Ecológico Paulo Gorsk para a População de Cascavel/PR**. Cascavel; 1ª Ed. Gráfica Assoeste., 2004.

BOTKIN, D.; KELLER, E. **Environmental Science: Earth as a Living**. 5th Ed. United States of America. John Wiley & Sons, Inc, 2005

BULL, L. J.; KIRKBY, M. J. **Gully processes and modelling**. *Progress in Physical Geography*. v. 21, n. 3, p. 354-374, 1997.

CAMPY, M.; MACAIRE, J. J. **Geologie des formations superficielles: geodynamique – fácies – utilization**. Paris: Marron, 1989.

CAMARGO, G. **Processo de erosão no Centro e Sul do Segundo Planalto Paranaense: evolução de encosta e influência da erosão subterrânea na expansão de voçorocas**. Dissertação (Mestrado em Geografia Programa de Pós-Graduação em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

CAMARGO, G. **O Significado Paleoambiental de Depósitos de Encostas e de Preenchimento de Canal no Município de Lapa (PR) no Sul do Segundo Planalto Paranaense**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005.

CAMILO, I. B. **Recomendações técnicas para adequação de estradas rurais**. Cuiabá: EMPAER-MT, 2007. Série Documentos, p. 36. 34.

CANTO, J. L.; URBANO, E.; VALGAS, R. U. E.; LACERDA, A. C. R. **Florestas do Brasil em resumo: dados de 2005-2010**. Serviço Florestal Brasileiro. Brasília: SFB, 2010. 152 p.

CASTANY, G. **Prospection et exploitation des eaux souterraines**. Paris, 717 p. 1968.

CHAVES, A. de.; SILVA, J. L. S. da. **Comportamento do fluxo das águas subterrâneas a Área de um Empreendimento potencialmente poluidor o Município de Santa Maria/ RS**. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Natal – RN. 2008.

COELHO NETTO, A. L. **Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia**. In: GUERRA, Antônio J. T.; CUNHA, Sandra B. da (Org.): Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994. p. 93-148.

CORRÊA, A. C. B. **Dinâmica geomorfológica dos compartimentos elevados do Planalto da Borborema, Nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado – IGCE, UNESP), Rio Claro. 386p. 2001.

CRUZ, G. C. F. da. **Alguns aspectos do clima dos Campos Gerais**. In: MELO, M. S.; MORO, R. S.; GUIMARÃES, G. B. (Org.): Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná. Ponta Grossa: Ed. UEPG, 2007. Cap. 5, p. 59-72.

CLEARY, R. W. **Águas subterrâneas**. 1989. ABRH. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAPNcAD/aguas-subterraneas>>. Acesso em: 05 dezembro 2012.

DELVIGNE, J. E. **Curso de micromorfologia das alterações minerais**. Apostila. São Paulo: USP/Instituto de Geociências, 1981. 149 p.

DUNNE, T. **Hydrology, mechanics, and geomorphic implications of erosion by subsurface flow**. In: Groundwater Geomorphology. Geological. Soc. Am. Spec. Pap. 252, 1-28, 1990.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solos**, 1979.

EMBRAPA. IAPAR. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Oeste do Paraná**. Bol. Téc. n. 39. (Divisão de Pesquisa Pedológica). Curitiba. 1972. p. 95.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro. 1997.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2009. I. Título. II. Série. xxvi, 412p.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 3ª Ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. 2001. Hidrogeologia – **Conceitos e Aplicações**. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais do Serviço Geológico do Brasil.

FERREIRA, V. M. **Voçorocas no Município de Nazareno, MG: Origem, uso da Terra e atributos do solo**. 81 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras. Lavras – MG, 2005.

FERRAZ, R. P. D. **Fundamentos de Morfologia, Pedologia, Física e Química do solo de Interesse no Processo de Recuperação de Área Degradada**, In: TAVARES, S. R. L. et al. (Org). Curso de Recuperação de Área Degradada: A visão da Ciência do Solo no Contexto do Diagnóstico, Manejo, Indicadores de Monitoramento e Estratégias de Recuperação. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2008. P. 9 – 59.

FELIPPE, M. F; MAGALHÃES JR; A. P. **Análise da variabilidade da vazão das nascentes no Parque das Mangabeiras (Belo Horizonte - MG) em relação aos condicionantes ambientais**. Disponível em: <[http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos\\_completos/eixo3/071.pdf](http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos_completos/eixo3/071.pdf)>. Acesso em: 02 maio 2013.

FOURNIER, F. **Climat et erosion**. Press Universitaires de France, 1960. 199p.

FORMAGGIO, L. F. **Estudo da Variabilidade da Piezometria dos Aquíferos Freáticos na Bacia do Alto Rio Jardim – Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado. Instituto de Geociência). Universidade de Brasília – DF. 2007.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo Dicionário Geológico Geomorfológico**. 2ª Ed: Bertrand Brasil. Rio de Janeiro, 2001.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

HURST, V. J. **Mapeamento de saprolito**. Tradução de J. Oswaldo de Araujo Filho. (s.e), Georgia, 1975.

IAPAR - Instituto Agrônomo do Estado do Paraná. **Cartas climáticas do Estado do Paraná-1994**. Londrina, IAPAR, 1994. 49 p. ilustr. (IAPAR, Documento, 18).

IBGE. **Mapa de biomas do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/fisicos>. Acesso em: 15 de maio. 2013.

INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. **Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais**. 2ª edição. Fevereiro de 2010.

JONES, J. A. A; RICHARDSON, J. M; JACOB, H. J. (1997). **Factors controlling the distribution of piping in Britain: a reconnaissance**. In: Journal Elsevier Geomorphology. Volume 20, October 1997, p. 289–306.

JONES, J. A. A. **Implications of natural soil piping for basin management in upland Britain**. In: Land Degradation & Development. v. 15, p. 325–349, May/June 2004.

JENNY, H. **Factors of soil formation, a system of quantitative pedology**. Mc Graw-Hill: New York, 1941. 281 p.

JENNY, H. **The soil resource: origin and behavior**. New York: Springe - Verlog, 1980. 377 p.(Ecological Studies, v.37).

KHAN, F. A.; FENTON, T. E. **Secondary iron and manganese distributions and aquic conditions in a Mollisol catena of central Iowa**. Soil Sci. Soc. Am. J., 60: 546-551, 1996.

LAL, R. **Erodibility and erosivity**. In: LAL, R. Soil erosion research methods. Wageningen, Netherlands: Soil and Water Conservation Society/International Soil Science Society, 1988. p.140-160. ISBN 0-935-73418-X.

LEMES, M. R. T. **Revisão dos efeitos da vegetação em taludes**. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIMA, E. R. V. **Erosão do Solo: Fatores Condicionantes e Modelagem Matemática**. Revista Cadernos do Logepa – Série Pesquisa. n: 01, Jan/Jun de 2003.

MEYER, L. D.; FOSTER, G. R.; NIKOLOV, S. **Effect of flow rate and canopy on rill erosion**. Transactions of the ASES. v. 18, n. 6, p. 905-911, 1975.

MENEZES, M. L.; CARVALHO, V. L. CRUZ, L. O.; VALADÃO, R. C. **Caracterização das formações superficiais em uma vertente do córrego do quebra – depressão de gouveia/mg**. VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional Conference on Geomorphology. Goiânia, GO, 2006.

MILANI, E. J; MELO, J. H. G; SOUZA, P. A de; FERNANDES, L. A; FRANCA, A. B. **Bacia do Paraná**. Boletim de Geociências. Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, maio/nov. 2007.

MONTEIRO, C. R. **Estimativa Espaço-Temporal da Superfície Potenciométrica do sistema Aquífero Guarani na Cidade de Ribeirão Preto (SP), Brasil**. Tese

(Doutorado) – Universidade Estadual Paulista – Instituto de Geociências Exatas. Rio Claro – SP. 2003.

MUGGLER, C. C.; CARDOSO, I. M.; RESENDE, M.; FONTES, M. P. F.; ABRAHÃO, W. A. P.; CARVALHO, A. F. DE. **Conteúdos Básicos de Geologia e Pedologia Para as Disciplinas de Solos**. Universidade Federal de Viçosa. Centro de Ciências Agrárias. Dept. de Solos. Viçosa - Minas Gerais 2005.

NAKASHIMA, P.; NÓBREGA, M. T. **Solos do Terceiro Planalto do Paraná – Brasil**. In: I ENCONTRO GEOTÉCNICO DO TERCEIRO PLANALTO PARANAENSE, 2003, Maringá, Anais. Maringá: UEM, 2003. 1 CD-ROM.

NUNES, E. D.; ROMÃO, P. A. **Análise da Entropia da Paisagem Como Subsídio ao Entendimento de Processos Erosivos na Microbacia do Córrego Barreiro – Goiânia – GO**. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia. Anais SINAGEO (CD), Belo Horizonte, 2008.

OLIVEIRA, J. B. Fatores de Formação. In: MONIZ, A. C. (Coord.). **Elementos de Pedologia**. São Paulo: Polígono, 1972. Cap.23, p.275-288.

OLIVEIRA, M. A. T. de. **Slope geometry and gully erosion development: Bananal, São Paulo, Brazil**. Zeitschrift für Geomorphologie, v. 34, n. 4, p. 423-434, 1990.

OLIVEIRA, J. B.; LACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento**. 2ª. Ed. Jaboticabal: FUNRP, 1992. 201 p.

OLIVEIRA, C. V.; KER, J. C.; CURTI, N.; DUARTE, M. N. & FONTES, L. E. F. **Caracterização de Concreções Ferro-Manganesas de Solos de Calcário no Norte do Estado de Minas Gerais**. R. Bras. Ci. Solo, 25:565-574, 2001.

PEDRON, F. de A. **Mineralogia, morfologia e classificação de saprolitos e neossolos derivados de rochas vulcânicas no Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria – RS. Centro de Ciências Rurais Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, 2007.

PICHLER, E. **Boçorocas**. In: Boletim da sociedade brasileira de geociências. 1953. v. 2, n. 1. p. 3 – 16.

PICCARRETA, M.; FAULKNER, H.; BENTIVENGA, M.; CAPOLANGO, D. **The influence of physico-chemical material properties on erosion processes in the badlands of Basilicata, Southern Italy**. In: Journal Elsevier Geomorphology. v. 81. p. 235–251. 29 November 2006.

PORTAL DO MUNICÍPIO DE CASCAVEL. **A Cidade**. Disponível em: <<http://www.cascavel.pr.gov.br/historia.php>> Acesso em: 24 dezembro. 2012.

RODRIGUES, J. E. **Estudo geotécnico de fenômenos erosivos acelerados (boçorocas)**. Anais: 4º Congresso Brasileiro de Geografia Física, 169-182, 1984.

RODRIGUES, S.; DUARTE, A. C. (2003). **Poluição do solo: revisão generalista dos principais problemas**. In: CASTRO, A; DUARTE, A; SANTOS, T (Ed.). O Ambiente e a Saúde. Lisboa, Instituto Piaget, PP. 136-176.

RUPOLO, E. L. **As propriedades do solo e o desmoronamento de fossas em Marechal Cândido Rondon – PR**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá. Maringá – PR. 2008.

SANTOS, P. S. 1989. **“Identificação Mineralógica de Argilas – I Análise Térmica Diferencial”**. In: EDGARD, B. Ciência e Tecnologia de Argilas, 2 ed, cap. 13, vol. I, São Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda.

SAUNDERS, A. D., STOREY, M., KENT, R. W., NORRY, M. J. **Consequences of plume-lithosphere interactions**. In: STOREY, M.; ALABASTER, A.; PANKHURST, R. J. (eds.). **Magmatism and the Causes of Continental Break-up**. Bath. Geological Society of London, p. 41-60. (Special Publication, 68), 1992.

SILVA, W. C. M.; **Caracterização Agroclimática da região de Cascavel/PR, Aplicada ao Cultivo do Milho. Cascavel - PR**. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná - PR. 2002.

SILVA, A. J. P. da; LOPES, R. C; VASCONCELOS; A. M; RUY B. C. Bahia CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores**. In: Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. CPRM, Brasília, 2003.

SILVA, W. B. da. **Túnel no distrito de São João do Oeste, região leste de Cascavel. 2011**. 1 fotografia, color. 7 cm X 11 cm.

SOUZA, C. G. de. **Caracterização de Solos nos Arredores da Serra Três Irmãos e da Serra da Moeda [manuscrito]**: Quadrilátero Ferrífero/MG. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. 2006.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy USDA** – Soil Conservation Service, 7<sup>th</sup> ed., Washington D. C. 1997.

SUGUIO, K. **Introdução à Sedimentologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1973. 280p.

SUGUIO, K. **Dicionário de Geologia Sedimentar e Áreas Afins**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1.222 p. 1998.

SCHWERTMANN, U.; FANNING, D. S. **Iron-manganese concretions in hydrosequences of soils in Loess in Bavaria**. Soil Sci. Soc. Am. J., 40:731-738, 1976.

STRAHLER, Arthur; STRAHLER, Alan. **Modern Physical Geography**. 4<sup>a</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 1992.

SHEPARD, F. P. **Nomenclature base on sand-silt-clay ratios**. Journal Sedim. Petrology, v. 24, p. 151-158, 1954.

TAVARES, S. R. de L. **Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da Ciência do Solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação** / Sílvio Roberto de Lucena Tavares. - Dados eletrônicos. - Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro. 1991. 123p.

VIEIRA, L. S. **Manual da Ciência do Solo**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres Ltda. 1975, 464p.

VILAR, O. M.; PRANDI, E. C. **Erosão dos solos**. In: CINTRA, J. C. A.; ALBIEIRO, J. H. (ed.). Solos do interior de São Paulo. São Carlos. Cap. 7.p. 177-206, 1983.

VOLK, L. B. da S.; COGO, N. P. **Inter-relação biomassa vegetal subterrânea estabilidade de agregados-erosão hídrica em solo submetido a diferentes formas de manejo**. Rev. Bras. Ciênc. Solo. vol. 32. n.4. Viçosa. July/Aug. 2008.

WATSON, D. A.; LAFLEN, J. M. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion, **Transactions of the ASAE**, v. 29, n. 1, p. 98-102, 1986.

WAICHEL, B. L.; LIMA, E. F.; LUBACHESKY, R.; SOMMER, C. A. **Pahoehoe flows from the central Paraná Continental Flood Basalts**. Bull. Volcanol. 68. p. 599-610, 2006.

WAICHEL, B. L. **Estruturação de Derrames e Interações Lava-Sedimento na Porção Central da Província Basáltica Continental do Paraná**. Tese (Doutorado Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Rio Grande do Sul, 2006.

WEGGEL, J. R.; RUSTOM, R. **Soil erosion by rainfall and runoff-state of art**. Geotextiles and Geomembranes. v. 11, p. 551 –572. 1982.

WILMOUTH, R. A.; WALKER G. P. L. **P-Type and S-type pahoehoe: a study of vesicle distribution patterns in Hawaiian lava flows**. J. Volcanol. Geotherm. Res. 55, p. 129-142, 1993.

ZHU, X. T. **Gully and tunnel erosion in the hilly Loess Plateau region, China**. In: Journal Elsevier Geomorphology. v. 153–154, p. 144–155, 1 June 2012.